



Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 11/2019

Koneellinen hakkuu

Seurantatutkimus

Paula Jylhä, Pekka Jounela, Markku Koistinen & Heikki Korpunen

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2019

Koneellinen hakkuu

Seurantatutkimus

Paula Jylhä, Pekka Jounela, Markku Koistinen & Heikki Korpunen

Luonnonvarakeskus, Helsinki 2019



**Northern Periphery and
Arctic Programme**
2014–2020



EUROPEAN UNION

Investing in your future
European Regional Development Fund

Viittausohje:

Jylhä, P., Jounela, P., Koistinen, M. & Korpunen, H. 2019. Koneellinen hakkuu : Seurantatutkimus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 53 s.



ISBN 978-952-326-716-9 (Painettu)

ISBN 978-952-326-717-6 (Verkkojulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkojulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-717-6>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Paula Jylhä, Pekka Jounela, Markku Koistinen & Heikki Korpunen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2019

Julkaisuvuosi: 2019

Kannen kuva: Antti Ollila

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Paula Jylhä, Pekka Jounela, Markku Koistinen ja Heikki Korpunen

Luonnonvarakeskus (Luke), www.luke.fi

Tutkimuksessa selvitettiin koneellisen hakkuun tuottavuutta ja ajankäytön rakennetta 23 hakkuukoneen tallentaman aineiston avulla. Hakkukertymä oli yhteensä 626 000 m³ ja se oli peräisin 1 573 korjuulohkolta eri puolilta maata. Hakkuun keskimääräinen tuotantoaikatuoottavuus oli 15,0 m³/h. Harvennuksilla se oli 10,2 m³/h ja päätehakkuilla 22,1 m³/h. Tuotantoaika käsittää käyttöajan lisäksi kaikki keskeytykset. Hakkuupoistuman keskimääräinen runkotilavuus oli 198 dm³ (harvennukset 127 dm³, päätehakkuut 327 dm³). Rungon keskitilavuus oli harvennuksilla huomattavasti pienempi kuin 1990-luvun alussa, jolloin tehtiin edellinen julkinen koneellisen puunkorjuun seurantatutkimus. Rungon keskitilavuus oli Pohjois-Suomessa pienempi kuin muilla alueilla, varsinkin päätehakkuilla. Hakkuun tuottavuus on noussut harvennuksilla suhteellisesti enemmän kuin päätehakkuilla.

Hakkuun ajanmenekkiä, polttoaineenkulutusta ja niihin vaikuttavia tekijöitä tutkittiin koneoppimisen avulla erillisissä osa-aineistoissa, joita jouduttiin muodostamaan ajanseuranta-aineiston konemerkki-kohtaisten erojen ja vaihtelevien tallennusparametrien vuoksi. Lisäksi selvitettiin kantokäsittelyliuoksen kulutusta. Rungon keskitilavuus ja hakkuutapa olivat tärkeimmät ajanmenekkiä selittävät tekijät. Työskentelytavan mukauttaminen hakkuutähteen talteenottoa varten alensi kuusivaltaisilla avohakkuilla tuottavuutta noin kymmenellä prosentilla. Tuotantoajan polttoaineenkulutus oli keskimäärin 0,9 l/m³ (rungon keskitilavuus 220 dm³), ja kantokäsittelyliuosta kului keskimäärin 0,6 l hakattua havupuukuutiometriä kohti (rungon keskitilavuus 256 dm³). Hakkuun tuottavuudesta ja polttoaineenkulutuksesta saadut tulokset viittaavat siihen, että suuria hakkuukoneita käytettiin osittain niiden optimaalisen käyttöalueen ulkopuolella.

Asiasanat: Puunkorjuu, hakkuu, tuottavuus, hakkuutähteen korjuu, kantokäsittely, polttoaineenkulutus

Alkusanat

Tutkimus käynnistettiin Metsäntutkimuslaitoksen rahoituksella vuonna 2014, ja Luonnonvarakeskus (Luke) rahoitti tutkimusta vuosina 2015–2017. Työ on viety päätökseen kesäkuussa 2017 käynnistyneessä Forest Business Innovation and Advancement -projektissa (FOBIA, <https://www.luke.fi/fobia/>), jonka rahoitus tulee pääosin EU:n Northern Periphery and Arctic Programme -ohjelmasta. Seurantatutkimusta varten perustettiin ohjausryhmä, johon on kuulunut Koneyritysten liitto ry:n ja keskeisimpien metsäteollisuusyritysten, Metsähallituksen, metsänomistajien sekä suurimpien metsäkonevalmistajien edustajat. Metsäkonevalmistajilta saimme arvokasta tukea perehtyessämme seurantatiedostojen sisältöön. Kiitämme tutkimsaineistoa luovuttaneita metsäkoneyrityksiä luottamuksesta.

Kokkolassa 28.2.2019

Paula Jylhä

Sisällys

Alkusanat.....	4
1. Johdanto	6
2. Aineisto ja menetelmät	7
2.1. Tutkimukseen osallistuneet koneet ja hakkuukertymät.....	7
2.2. Ajanseurannan periaatteet	9
2.3. Aineistojen muodostaminen.....	11
2.3.1. Tiedostojen käsittely	11
2.3.2. Hyödynnetyt StanForD-muuttujat	12
2.4. Aineistojen laajuudet	12
2.5. Laskentamenetelmät	14
2.5.1. Korjuuolosuhteet ja ajankäyttö.....	14
2.5.2. Hakkuun ajanmenekin mallitus.....	15
2.5.3. Polttoaineen ja kantokäsittelyliuoksen kulutuksen mallitus.....	15
3. Tulokset	17
3.1. Korjuuolosuhteet	17
3.1.1. Hakkuutavat ja puulajisuhteet	17
3.1.2. Rungon koko	18
3.1.3. Korjuulohkon koko	21
3.1.4. Puutavaralajien lukumäärä	22
3.1.5. Ajomatkat ja -nopeudet	23
3.2. Ajankäyttö	25
3.2.1. Ajankäytön rakenne	25
3.2.2. Käyttöasteet	27
3.2.3. Lisätöiden ajanmenekki.....	28
3.3. Hakkuun tuottavuus.....	29
3.3.1. Keskimääräiset tuottavuudet	29
3.3.2. Hakkuun tuottavuuteen vaikuttavat tekijät	31
3.4. Polttoaineenkulutus.....	36
3.5. Kantokäsittelyliuoksen kulutus	41
4. Tarkastelu	42
5. Päätelmät.....	48

1. Johdanto

Puunkorjuutaksat perustuivat vuoteen 1991 saakka valtakunnallisiin sopimuksiin, joiden taustalla olivat Metsätehon tuottavuus- ja maksuperustetutkimukset. Kilpailulainsäädännön muutoksen jälkeen korvaus tehdystä työstä on määräytynyt pitkälti tarjouskilpailun perusteella, joten yrittäjiltä vaaditaan monipuolista liiketoimintaosaamista. Tarjouksen laskennassa on tunnettava mm. korjuuolosuhteiden vaikutus tuottavuuteen ja koneiden ajankäytön rakenne. Lisäksi toimeksiantajat ovat siirtäneet metsäkoneyrittäjien vastuulle erilaisia puunkorjuun lisätöitä (esim. suunnittelu), joten korjuutyön hinnoittelu on ongelmallista.

Kilpailulainsäädännön uudistaminen keskeytti myös 1990-luvun alussa alkaneen, jatkuvaksi tarkoitetun maksuperustetutkimuksen. Tuorein suomalainen metsäkoneiden laaja seurantatutkimus (Kuitto ym. 1994) perustuu vuosina 1990–1992 kerättyihin maksuperustetutkimuksen aineistoihin. Tämän jälkeen metsäkoneet ovat kehittyneet ja korjuuolosuhteet muuttuneet. Käytännössä kaikki ainespuu hakataan nykyisin koneellisesti. Vuonna 1992 hakkuiden koneellistamisaste oli metsäteollisuuden ja Metsähallituksen puunkorjuussa jo noin 63 prosenttia, mutta valtaosa harvennushakkuista tehtiin vielä miestyönä (Strandström 2018). Sen vuoksi nykyinen koneellisen hakkuun leimikkorakenne poikkeaa 1990-luvun alun tilanteesta.

Nykytietämys metsäkoneiden tuottavuudesta perustuu lähinnä lyhytaikaisiin aikatutkimuksiin ja vanhentuneeseen tietoon koneiden ajankäytöstä. Aikatutkimuksissa havainnoijan vaikutus on suuri, ja tutkimuskoealat sijoitetaan tavallisesti puustoltaan tasaisiin kohteisiin ja helpohkoon maastoon. Lisäksi kuljettaja saattaa työskennellä tavanomaista joutuisammin, koska työntutkija seuraa työsuoritusta ja mittausjaksot ovat lyhyitä ja sijoittuvat yleensä päiväsaikaan. Metsäkoneet keräävät jatkuvasti standardoitua tietoa koneiden toiminnoista ja tuotannosta, mutta sitä ei vielä hyödynnetä laajamittaisesti tutkimuksessa. Tällainen aineiston hankinta on kustannustehokasta, eikä kuljettajan työskentely juuri häiriinny (Nuutinen 2013).

Työn tavoitteena oli tuottaa ajantasaista tietoa hakkuukoneiden tuottavuustasosta ja korjuuolosuhteista niiden keräämän seurantatiedon avulla. Aineiston analysoinnissa sovellettiin perinteisten tilastotieteellisten menetelmien ohella koneoppimista. Tietoa saatiin lisäksi mm. polttoaineen ja kanto-käsittelyliuoksen (urea) kulutuksesta sekä hakkuutähteen talteenoton vaikutuksesta hakkuun tuottavuuteen.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1. Tutkimukseen osallistuneet koneet ja hakkuukertymät

Tutkimusaineisto kerättiin aikavälillä 21.10.2014–31.3.2017 yhteensä 23 hakkuukoneelta eri puolilta Suomea (taulukko 1, kuvat 1–2). StanForD Classic -standardin (Skogforsk 2012) mukaiset ajanseuranta- ja tuotantotiedostot (drf- ja prd-tiedostot) saatiin hakkuukoneilta pääasiassa sähköpostilla, osittain automatisoituina lähetyksinä, tai yrityksen kautta. Lisäksi yhden koneen tiedostot poimittiin selainpohjaisesta konekannan hallintaohjelmistosta, jonne yrittäjä oli antanut käyttöoikeuden. Luvat prd-tiedostojen luovuttamiseen pyydettiin mahdollisilta asiakasyrityksiltä keskitetysti etukäteen. Ajankäytön ja tuotannon seuranta oli normaali käytäntö suurimmalla osalla seurantaan osallistuneista koneista, mutta seurannan tarkkuus vaihteli. Tiedostoja ei saatu kaikissa tapauksissa kattavasti koko seurantajaksolta, eikä mahdollisten seisokkien syitä selvitetty. Koneilla työskenneltiin viittä konetta lukuun ottamatta pääsääntöisesti kahdessa vuorossa, ja aineistoa kertyi yhteensä 56 eri kuljetajalta.

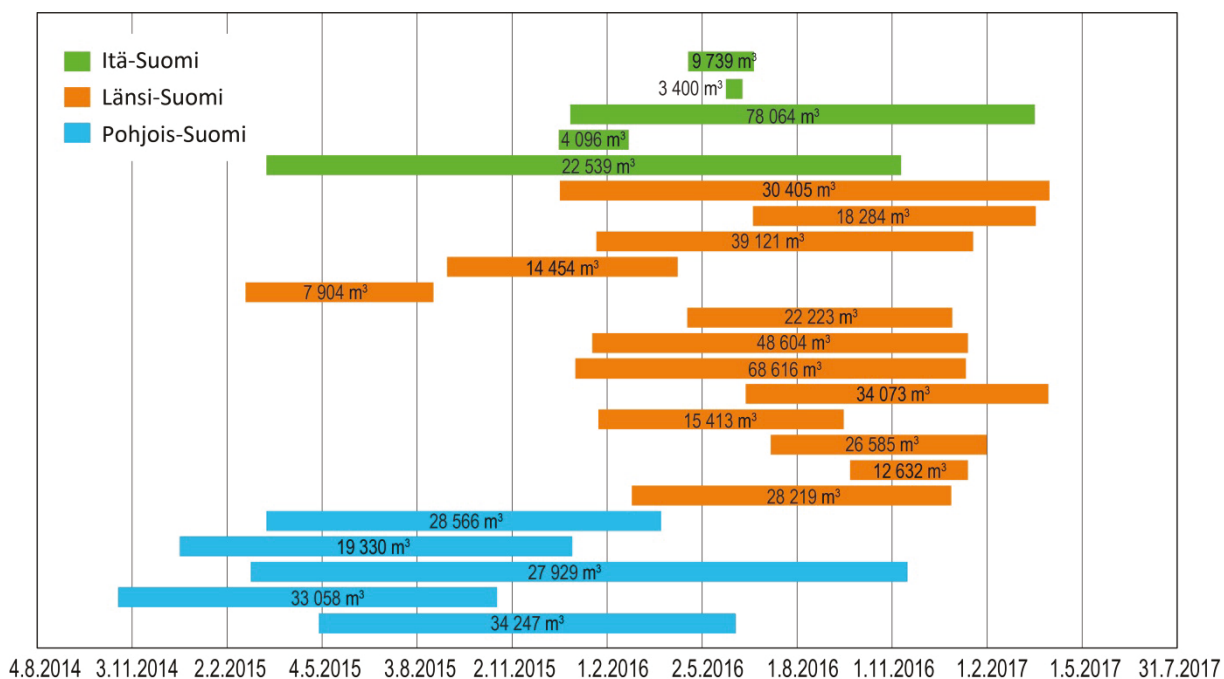
Koneet ja hakkuulaitteet jaettiin kokoluokkiin soveltamalla Erikssonin ja Lindroosin (2014) käyttämää luokitusta. Alustakoneen kokoluokka (M–XL) määräytyi ajoneuvoliikennerekisteriin ilmoitetun oman massan tai konevalmistajan esitteissä olleiden tietojen perusteella. Mahdollisen lisävarustuksen vaikutusta koneen massaan ei otettu huomioon. Hakkuulaitteen kokoluokka (M–XXL) perustui laitevalmistajien ilmoittamiin massoihin ja katkaisuläpimittoihin. Seitsemäntoista koneen käyttöönottopäivä saatiin selville Trafin ajoneuvoliikennerekisteristä tai metsäkoneyrittäjältä. Näiden koneiden keski-ikä oli seurannan alussa 2,1 vuotta ja lopussa 2,9 vuotta. Kaksi uusinta konetta otettiin käyttöön seurannan alussa, ja vanhin kone oli seurannan päättyessä 5,2 vuotta vanha. Seurannan loppuun mennessä vähintään vuoden käytössä olleiden koneiden (15 kpl) mittareihin oli kertynyt vuosittain keskimäärin 2 538 käyntituntia (1 494–3 578 h/v, keskihajonta 514 h).

Taulukko 1. Tutkimuksessa mukana olleet koneyhdistelmät sekä alustakoneiden ja hakkuulaitteiden kokoluokittelu.

ALUSTAKONE		HAKKUULAITE		KPL			Yhteensä
Koko-luokka	Merkki ja malli	Koko-luokka	Malli	Pohjois-Suomi	Länsi-Suomi	Itä-Suomi	
M	Komatsu 901.4	M	340	1			1
M	Ponsse Beaver	M	H53E		1		1
L	John Deere 1170E	M	H413		3	1	4
L	John Deere 1170E	M	H460	1	2		3
L	John Deere 1170E	L	H414			2	2
L	Komatsu 901TX.1	L	350		2		2
L	Ponsse Fox	L	H6		1		1
XL	John Deere 1270E	L	H414	1	1	1	3
XL	John Deere 1270E	XL	H415			1	1
XL	John Deere 1270E	XXL	H480	1	2		3
XL	Ponsse Scorpion	L	H6	1			1
XL	Ponsse Scorpion King	L	H6		1		1
	Kaikki koneet			5	13	5	23

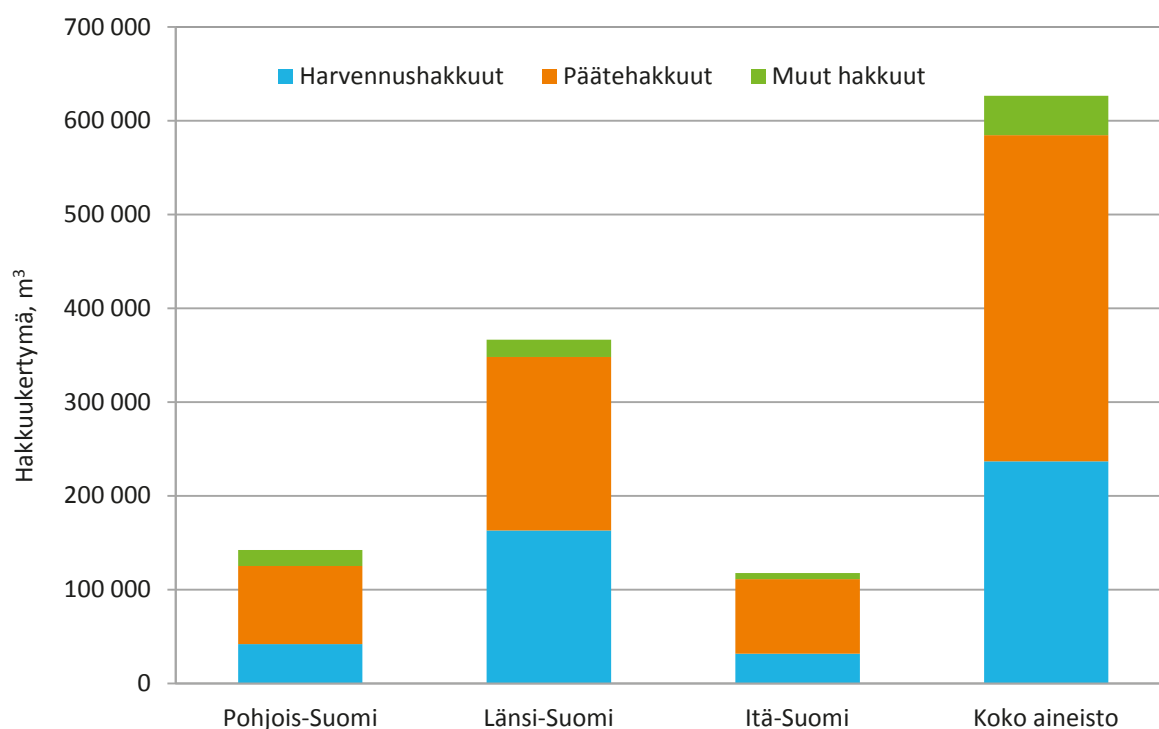


Kuva 1. Tutkimuksessa käytetty aluejako.

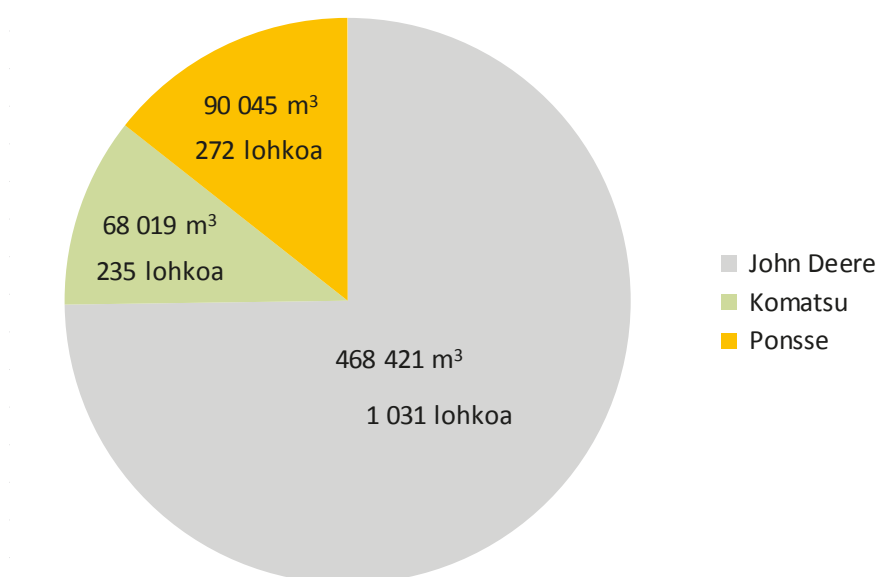


Kuva 2. Seurannassa olleiden koneiden hakkaamat puumäärät ja seuranta-ajat alueittain.

Ajanseurantatiedostojen sisältämä hakkuukertymä oli yhteensä noin 626 200 m³, joka oli peräisin 1 537 korjuulohkolta (kuvat 2–3, liite 1). Ajanmenekin mallinnuksessa voitiin käyttää John Deere- ja Komatsu-merkkisten koneiden talleentamaa aineistoa, joka vastasi 75 %:a koko hakkuukertymästä (kuva 4, liite 2).



Kuva 3. Hakatut puumäärät alueittain ja hakkuutaparyhmittäin.



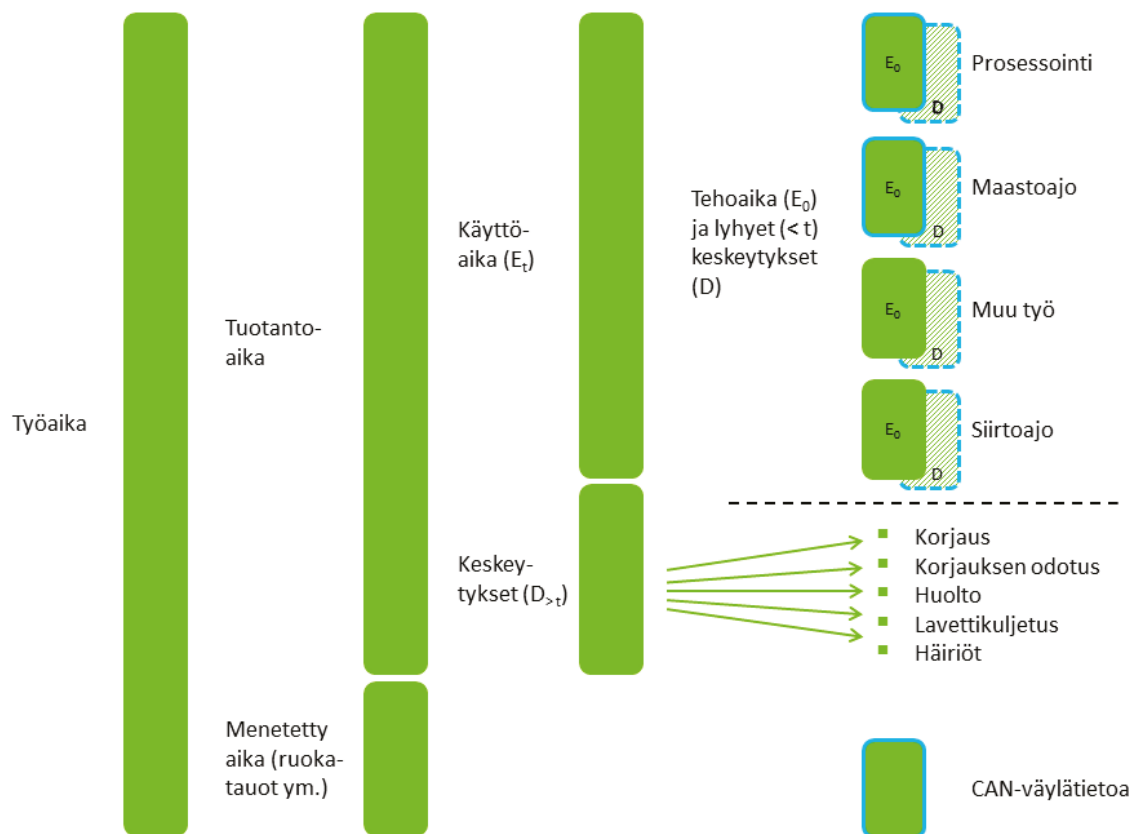
Kuva 4. Seuranta-aineisto konemerkeittäin.

2.2. Ajanseurannan periaatteet

Tutkimuksessa hyödynnettiin StanForD Classic -standardin (Skogforsk 2012) mukaisia ajanseuranta- (drf) ja tuotantotiedostoja (prd), jotka tallentuivat hakkuukoneille korjuulohkoittain. Korjuulohkolla tarkoitetaan yhdestä tai useammasta metsikkökuvioista tai kuvion osasta koostuvaa kokonaisuutta (Äijälä ym. 2013), joka on yleensä hakkuutavaltaan yhtenäinen. Drf-tiedostot sisältävät ajanseurannan lisäksi tietoa mm. hakkuukertymistä, polttoaineenkulutuksesta ja ajomatkoista.

Ajanseuranta jakaa työn automaattisesti prosessointiin ja maastoajoon (kuva 5). Kuljettaja puolestaan rekisteröi muut työlajit (muu työ ja siirtoajo) sekä keskeytysten syyt. Työ rekisteröityy prosessoinniksi silloin, kun hakkuulaite ja nosturi ovat aktiivisia. Maastoajossa hakkuulaite ja nosturi ovat passiivisia, mutta ajovoimansiirto on päällä. Koneen tietojärjestelmä rekisteröi keskeytyksen silloin, kun se ei saa pulsseja ajovoimansiirrosta tai hakkuulaitteelta ja nosturilta. Ellei kuljettaja rekisteröi keskeytyksen syytä sen alettua, se kysytään asetetun katkossuodatusajan täyttyessä. Työlajien (työvaiheiden) suomenkieliset nimitykset vaihtelevat eri konemerkkien järjestelmissä. Esimerkiksi prosessoinnin (John Deere) vastineena käytetään työstämistä (Komatsu) ja hakkuuta (Ponsse).

Suodatusajat määrittävät sen, miten työlajit kirjautuvat ajanseurantatiedostoihin. Kun työvaiheen kesto ylittää asetetun työvaihesuodatusajan, työlaji rekisteröityy pulssien lähteen perusteella. Jos pulssien tulo keskeytyy mutta jatkuu ennen kuin asetettu minimisuodatusaika täyttyy, niin tämä lyhyt keskeytys ("mikrotauko") rekisteröityy osaksi sitä edeltävää työvaihetta. Samoin kuin työlajien, myös suodatusaikojen nimitykset vaihtelevat eri konemerkkien järjestelmissä. Tämän tutkimuksen aineistossa minimisuodatusaika oli pääasiassa 30 s (15–30 s). Työvaihesuodatusaika (pääsuodatus, perusuodatus) oli pääsääntöisesti 120 s (60–120 s). Siten esimerkiksi lyhyet siirtymiset työpisteiden välillä sisältyvät useimmiten prosessoinniksi rekisteröityneeseen aikaan. Katkossuodatusaika (tauoko, seisoki) oli yleisimmin 900 s (300–900 s).



Kuva 5. Ajankäytön rakenne drf-tiedostoissa.

Drf-tiedostojen sisällöissä oli yhteisestä standardista huolimatta eroja konemerkkien välillä (taulukko 2), joten tulosten laskennassa jouduttiin tekemään erilaisia rajoituksia. Tehoajat (E_0) sisältyivät vain John Deeren ja Komatsun ajanseuranta-aineistoihin, joissa ne on eritelty työlajeittain (prosessointi, maastoajo, muu työ ja siirtoajo). Ponssin tiedostoissa tarkimmat ajat (E_t) sisältävät myös katkossuodatusaika lyhyemmät keskeytykset, joten Ponssin ajanseuranta-aineistoa ei voitu hyödyntää teho-

ajanmenekin mallinnuksessa. John Deeren ja Ponssen tuottamat drf-tiedostot sisälsivät aikamuuttujien lisäksi tietoa mm. polttoaineenkulutuksesta ja ajomatkoista em. työlajeille kohdistettuna.

Taulukko 2. Keskeisimmät ajanseurantatiedostojen (drf) muuttujat konemerkeittäin. Osa puuttuvaksi merkityistä tiedoista voi sisältyä muihin kuin tässä tutkimuksessa hyödynnettyihin muuttujiin tai poiketa StanForD-standardin määrittelyistä.

Muuttuja	Konemerkki		
	John Deere	Komatsu	Ponsse
Tehoaika (E_0) ¹	x	x	
Käyttöaika (E_t) ²	x	x	x
Tuotantoaika	x	x	x
Työvuoron pituus	x		
Ajomatkat työlajeittain			
- metreinä	x		
- täysinä kilometreinä			x
Polttoaineenkulutus (l)	x		x
Moottorin käyntitunnit korjuulohkoittain		x	x

¹Minimisuodatusajan alittavat tauot sisältyvät E_0 -aikoihin

²Käyttöajat esitetään yleensä E_{15} -aikoina, jotka tuotettiin tässä tutkimuksessa laskennallisesti katkossuodatusaikojen vaihtelun vuoksi.

Prosessoinniksi rekisteröityneiden E_0 -aikojen katsottiin vastaavan perinteisessä metsätyöntutkimuksessa tarkoitettuja hakkuun tehoaikoja (esim. Haarlaa ym. 1984, Kuitto ym. 1994, Forest work... 1995), vaikka niihin sisältyykin lyhyitä, minimisuodatusajan (< 30 s) alittavia taukoja ja osa prosessoinnista voi tapahtua muiksi työlajeiksi rekisteröityneellä ajalla, lähinnä maastoajon aikana. Maastoajoa ei kuitenkaan sisällytetty työaikaan ajanmenekin mallinnuksessa, sillä se voi sisältää pitkiäkin siirtymisiä esim. tienvarresta työmaalle tai hakattavien metsikkökuvioiden välillä. Aikatutkimuksissa tällaiset siirtymiset luetaan yleensä keskeytyksiksi. Esimerkiksi Kuiton ym. (1994) aikatutkimuksessa yli 20 metrin siirtymiset tulkittiin keskeytyksiksi, joiden kesto oli kyseisessä tutkimuksessa raportoiduilla ajonopeuksilla ensimmäisessä maastoluokassa harvennuksilla vähintään 1,5 min ja päätehakkuilla 1,0 min.

Käyttöajalla (E_{15}) tarkoitetaan tässä tutkimuksessa prosessoinnin, maastoajon, muun työn ja siirtoajon yhteenlaskettua E_{15} -aikaa. E_{15} -ajat tuotettiin laskennallisesti katkossuodatusajan vaihtelun takia, ja niihin sisältyy em. työlajien lisäksi kaikki viittätoista minuuttia lyhemmät keskeytykset, joita voi esiintyä minkä tahansa työlajin aikana. Drf-tiedostojen ajat ovat katkossuodatusajan ylittäviä keskeytyksiä lukuun ottamatta yhteenlaskettuja, eikä yksittäisten työjaksojen kestoa tunneta niiden vähimmäispituutta lukuun ottamatta. Siksi ***E_{15} -ajoista ajoista ei voitu erotella viittätoista minuuttia pitempiä jaksoja keskeytyksinä pidettäviä työlajeja, eivätkä tämän tutkimuksen E_{15} -ajat täysin vastaa esim. Kuiton ym. (1994) raportoimia E_{15} -aikoja.*** Tutkimuksen aikakäsitteet on määritelty liitteessä 3.

2.3. Aineistojen muodostaminen

2.3.1. Tiedostojen käsittely

Laskenta-aineisto koostettiin drf- ja prd-tiedostojen lukuun, automaattiseen muokkaukseen ja tiedonsiirtoon kehitetyllä sovelluksella, jolla voitiin käsitellä tiedostoja sekä yksittäin että eräajona. Sovellus toteutettiin Microsoft Access -ohjelmalla VBA-kehitysympäristössä (Microsoft 2017). Aineiston

ulosvientiformaattina oli Microsoft Excel -laskentataulukko, jossa siihen lisättiin erilaisia luokittelu-muuttujia (mm. toimialue, alustakoneen ja hakkuulaitteen kokoluokka sekä korjuulohkon aloituspäivän vuosineljännes).

Suurin osa hyödynnetyistä ajanseurantatiedostojen muuttujien arvoista on ilmoitettu sekä lohko-että kuljettajakohtaisina, mutta tulosten laskennassa ja mallinnuksessa käytettiin ainoastaan korjuulohkokohtaisia tietoja. Lohkon pääpuulajiksi määritettiin se puulaji, jonka osuus hakkuukertymästä oli suurin. Tuotantotiedostoista (prd) poimittiin ainoastaan erillisten puutavaralajien lukumäärä lohko-tasolla, ilman yksittäisten puutavaralajien määrille asetettuja liittyviä kynnysarvoja. Korjuulohkojen pinta-alat ja siten myöskään poistuman tiheydet eivät olleet tiedossa.

2.3.2. Hyödynnetyt StanForD-muuttujat

Tuotantoajat sekä viittätoista minuuttia lyhyemmät katkokset sisältävät käyttöajat (E_{15}) laskettiin koko aineistolle. Tuotantoaika (hyödynnetty aika) käsittää työlajikohtaisten käyttöaikojen (E_t) (RUN-TIME, muuttuja 316) lisäksi kaikki keskeytykset. Koneiden työskentelyyn käytettävissä olleet ajat poimittiin muuttujasta 318 (WORKTIME) ja kuljetajien työvuorojen lukumäärät muuttujasta 329 (SHIFTDATA). Korjuulohkokohtaiset E_{15} -ajat laskettiin lisäämällä lyhyitä keskeytyksiä sisältäviin E_t -aikoihin katkossuodatusajan ylittäneet mutta alle 15 minuuttia kestäneet katkokset, jotka rekisteröi-tyvät yksittäin muuttujaan 317 (IRTIME). Myös työlajikohtaiset E_0 -ajat, polttoaineenkulutukset ja ajetut matkat saatiin muuttujasta 316. Tietoa koneiden lavettisiirtojen kestosta ja siirtojen lukumää-ristä saatiin 15 koneelta yhteensä 236 korjuulohkolta, ja tieto sisältyi muuttujaan 317 (IRTIME). Tie-dot puunkorjuun lisätöihin liittyvistä keskeytyksistä saatiin muuttujasta 330 (SPECTIME) yhteenlas-kettuina.

Ajanseurantatiedostoissa oli ainoastaan hintamatriisien mukaisten puutavaralajien hakkuukertymät puulajeittain, ja ne poimittiin muuttujasta 241 (TOTMERCVOL). Runkojen keskitilavuudet laskettiin jakamalla lohko-kohtaiset hakkuukertymät runkoluvuilla, jotka saatiin muuttujasta 223 (NUMSTE-MOP). Joukkokäsitellyt rungot ja kertymät saatiin muuttujista 231 ja 246 (STMSINBUNCH ja BUN-CHEDVOL). Puutavaralajien lukumäärän laskennassa tarvittavat tiedot saatiin prd-tiedostojen muut-tujista 121 (ASSTDESCR) ja 232 (NUMLGS).

Muuttuja 316 sisältää myös työlajeille jaetun polttoaineenkulutuksen litroina (John Deere ja Ponsse) sekä ajomatkat metreinä (John Deere) tai täysinä kilometreinä (Ponsse). Polttoaineenkulutus hakat-tua kuutiometriä kohti laskettiin jakamalla tuotantoajalle tai prosessoinnin E_0 -ajalle (John Deere) kohdistunut polttoaineen käyttö korjuulohkon hakkuukertymällä. Polttoaineen kulutuslukemat pe-rustuvat moottorin ohjainyksikön laskenta-algoritmeihin. Osalla koneista seurattiin erityisjärjestelyin kantokäsittelyliuoksen (urea) kulutusta ja lisätöiden ajanmenekkiä.

2.4. Aineistojen laajuudet

Koko aineistoa käytettiin rungon keskitilavuuksien ja lohko-kohtaisten hakkuukertymien laskennassa (taulukko 3, liite 1), mutta tietoa puutavaralajien lukumäärästä ei saatu yhden koneen tiedostoista. Hakattua kuutiometriä kohti ajetut matkat ja niiden kohdistuminen työlajeille laskettiin, koska ne saattavat kuvata työskentelytavan lisäksi korjuuolosuhteita (esim. maaston kaltevuus, leimikon etäi-syys tiestä). Riittävällä tarkkuudella (m) ilmaistut ajomatkat työlajeittain sisältyivät vain John Deeren koneiden drf-tiedostoihin, lukuun ottamatta niitä korjuulohkoja, joilla matkamittari ei toiminut.

Työlajikohtaisten aikojen tarkkuus oli merkittävin aineistoa jakava tekijä. Tuotantoaika- ja käyttötun-tituottavuudet ($m^3/E_{15}\text{-h}$) voitiin laskea koko aineistolle. John Deeren ja Komatsun koneiden tallen-tamaa aineistoa (liite 2) voitiin käyttää hakkuun tehoajanmenekin mallinnukseen, sillä niiden ajan-

seurantatiedostot sisältävät myös työvaiheittaiset tehoajat (E_0). Tästä aineistosta harvennushakkuista (ensi- ja muut harvennukset) oli noin 199 700 m³ (578 korjuulohkoa) ja päätehakkuista (kaistale-, avo- ja siemenpuuhakkuut) noin 302 000 m³ (509 korjuulohkoa). Hakkuu tehtiin yksinpuin lukuun ottamatta yhtä Pohjois-Suomen konetta. Sillä tehtiin satunnaisesti joukkokäsittelyä 21 korjuulohkolla, joista 11 oli harvennuksia, 2 päätehakkuista ja 8 muita hakkuista. Näiltä lohkoilta joukkokäsittelynä hakattu puumäärä oli yhteensä 72 m³. Joukkokäsittelylohkot ovat mukana tulosten laskennassa lukuun ottamatta hakkuun ajanmenekin mallinnusta. Hakkuutähdettä oli prosessoitu kasoihin osalla ajanmenekin mallitusaineiston korjuulohkoista. Nämä lohkot sisältyvät laskenta-aineistoon (73 päätehakkuulohkoa, 7 harvennuslohkoa). Hakkuutähteen kasauksen vaikutusta prosessoinnin tuottavuuteen tarkasteltiin erikseen kuusivaltaisilta avohakkuilta saadussa aineistossa, joka oli peräisin seitsemältä John Deere -merkkiseltä koneelta. Näitä lohkoja oli yhteensä 147 kpl, joista 48:lla hakkuutähte prosessoitiin kasoihin sen myöhempää talteenottoa varten. Yrittäjiltä saadun tiedon mukaan hakkuutähteen talteenottoa ei tehty muilla ajanmenekin mallitusaineistoon kuuluneilla koneilla.

Taulukko 3. Tunnuslukujen laskennassa käytettävissä olleet tunnusmerkit.

	Korjuulohkoja, kpl	Hakkuukertymä, m ³	Koneita, kpl
Korjuulohkojen ominaisuudet			
runkoluku puulajeittain (kaikki merkit)	1 538	626 485	23
hakkuukertymä puulajeittain (kaikki merkit)	1 538	626 485	23
puutavaralajien lkm (kaikki merkit)	1 437	598 454	22
ajomatkat, m (John Deere)	998	457 624	16
Ajankäyttö			
työaika (John Deere)	1 031	468 421	16
tuotantoaika (kaikki merkit)	1 538	626 485	23
käyttöaika, E_{15} (kaikki merkit)	1 538	626 485	23
työlajikohtaiset tehoajat (John Deere, Komatsu)	1 266	536 440	19
hakkuutähteen talteenotto (John Deere)	147	108 585	7
Käyttöasteet			
tekninen käyttöaste (kaikki merkit)	932	376 708	17
toiminnallinen käyttöaste (kaikki merkit)	485	204 373	11
Kantokäsittelyliuoksen (urea) kulutus (John Deere, Komatsu)	288	136 261	10
Polttoaineenkulutus (John Deere, Ponsse)	1 226	537 373	19

Puunkorjuun lisätöihin ym. liittyvien keskeytysten ajanmenekkiä seurattiin yhteensä yhdeksän koneen (6 John Deereä, 3 Ponssea) korjuulohkoilla, jotka oli hakattu viiden minuutin katkossuodatusaikaa käyttäen. Viiden minuutin katkossuodatusaikaan päädyttiin siksi, että merkittävä osa keskeytyksistä saataisiin rekisteröidyksi, mutta työ ei häiriintyisi liikaa. Tarkastelussa olivat mukana leimikon suunnittelu ja seuranta (kontrollimittaukset ja korjuujäljen seuranta), hallinto (raportointi, kuviotietojen päivitys, varastojen merkintä), normaaleista huoltorutiineista poikkeavat kantokäsittely- ja väri-merkklauslaitteen korjaukset, mittalaitteen kalibrointi (vain Ponsse) sekä työmaavierailut (vain John Deere). Kaikilla koneilla ei kuitenkaan voitu seurata kaikkia em. keskeytyksiä, joten seurantalohkojen lukumäärä vaihteli keskeytystyyppittäin (taulukko 4). Laskenta-aineistoa muodostettaessa yksittäisten keskeytysten ajanmenekki laskettiin yhteen korjuulohkoittain. Rekisteröityjen keskeytysten lukumääriä ei poimittu tiedostoista, joten niiden keskimääräisiä kestoja ei voitu laskea. Saatu tieto ei ole kattavaa, sillä osa keskeytyksistä jää alle viiden minuutin mittaisiksi. Lisäksi kuljettajat todennä-

köisesti unohtivat usein rekisteröidä keskeytyksen syyn, sillä rutiininomaisia keskeytyksiäkin (esim. suunnittelu ja seuranta) oli rekisteröity vain pienellä osalla korjuulohkoista.

Taulukko 4. Puunkorjuun lisätöiden aiheuttamien keskeytysten seuranta-aineisto.

	Seuranta-koneiden lkm	Korjuulohkot, kpl	Esiintymiskerrat, kpl
Hallinto	9	506	110
Suunnittelu ja seuranta	9	506	200
Työmaavierailut	6	329	66
Mittalaitteen kalibointi	2	150	52
Värimerkkauslaitteen korjaus ja huolto	8	479	19
Kantokäsittelylaitteen korjaus ja huolto	8	479	17

2.5. Laskentamenetelmät

2.5.1. Korjuuolosuhteet ja ajankäyttö

Ellei toisin mainita, korjuukohteiden ominaisuuksiin, ajankäytön rakenteeseen ja tuottavuuksiin liittyvät keskiarvot laskettiin hakkuukertymällä tai käytetyllä ajalla painottaen niin, että korjuulohkokohdaiset tunnusluvut laskettiin yhteen ryhmittäin (esim. alue, hakkuutapa, koneen kokoluokka). Siten esimerkiksi tietyn alueen hakkuukertymän keskimääräinen rungon tilavuus saatiin jakamalla kyseisen alueen yhteenlaskettu hakkuukertymä vastaavalla yhteenlasketulla runkoluvulla.

Koneiden käyttöasteet määritettiin kaikki kolme konemerkkiä kattavasta aineistosta, joka oli tallennettu 15 minuutin katkossuodatuksella. Koska käyttöaika (E_{15}) voi sisältää keskeytyksiä tulkittavaa työtä (maastoajo, muu työ ja siirtoajo), prosessoinniksi rekisteröityneen E_{15} -ajan oletettiin vastaavan varsinaista käyttöaikaa. Siten menettely vastaa varsin hyvin Haarlaan ym. (1984) ja Kuiton ym. (1994) kuvaamaa laskentatapaa. Tekninen käyttöaste (MA) kuvaa koneen teknistä toimintavarmuutta ja se määritettiin seuraavalla tavalla:

$$MA = \frac{\text{prosessointi } E_{15}}{\text{prosessointi } E_{15} + \text{korjaus} + \text{korjauksen odotus} + \text{huolto}}$$

Toiminnallinen käyttöaste (MU) mittaa teknisen toimintavarmuuden lisäksi myös organisaation toimivuutta. Huomattava osa teknisen käyttöasteen laskennassa käytetystä aineistosta jouduttiin jättämään pois toiminnallisen käyttöasteen laskennasta, koska korjuulohkoille ei ollut kirjautunut lainkaan tietoa koneiden siirroista joko ajamalla tai lavettisiirtona työmaalta toiselle. Todennäköisesti siirrot tehtiin suurimmaksi osaksi korjuulohkojen päättämisen jälkeen, joten ne eivät kirjautuneet millekään korjuulohkolle. Lisäksi siirtoja tekivät muut kuin koneiden kuljettajat, tai siirtojen rekisteröinti ei ollut mahdollista seurantajärjestelmän asetusten vuoksi. Toiminnallinen käyttöaste laskettiin kaavalla:

$$MU = \frac{\text{prosessointi } E_{15}}{\text{prosessointi } E_{15} + \text{maastoajo } E_{15} + \text{muu työ } E_{15} + \text{maantieajo } E_{15} + \text{korjaus} + \text{korjauksen odotus} + \text{huolto} + \text{häiriöt} + \text{lavettisiirrot}}$$

Edellä kuvatuissa laskelmissa käytetty prosessoinnin, maastoajon, muun työn ja siirtoajon E_{15} -ajat saatiin muuttujasta no. 316 (aikatyypit 10–13), keskeytykset ja lavettisiirrot muuttujasta no. 317. StanForD-määrittelyn mukaan muulla työllä tarkoitetaan tuottamatonta konetyötä, esimerkiksi

upoksissa olevan koneen vetämistä tai hakkuutähteen levittämistä ajouralle. Joissakin tapauksissa todennäköisesti erilaisia keskeytyksiä oli rekisteröity muuksi työksi melko säännönmukaisesti, mutta tämä virheellinen käytäntö ei kuitenkaan vaikuta toiminnallisen käyttöasteen laskentaan.

2.5.2. Hakkuun ajanmenekin mallitus

Hakkuun ajanmenekin mallinnuksessa (John Deere - ja Komatsu-aineisto, liite 2) sovellettiin koneoppimista (machine learning). Prosessoinniksi rekisteröityneen E_0 -ajan katsottiin vastaavan normaalia hakkuutyötä, johon sisältyy myös tavanomaiset työpistesiiirtymiset. Selitettävänä muuttujana oli harvennus- ja päätehakkuiden korjuulohkokohtainen prosessoinnin tehoajanmenekki (E_0 -min/m³) hakattua kuutiometriä kohti, mutta tulokset esitetään pääsääntöisesti tehotuntituotoksiksi (m³/E₀-h) muunnettuna. Selittäviä muuttujia olivat rungon keskitilavuus (dm³), alue (Itä-, Länsi- ja Pohjois-Suomi), alustakoneen kokoluokka (M, L, XL), hakkuulaitteen kokoluokka (M, L, XL, XXL), hakkuukertymän pääpuulaji (se puulaji, jonka osuus hakkuukertymästä on suurin; mänty, kuusi, koivu tai muu lehtipuu), puutavaralajien lukumäärä (kpl) ja lohkon aloituksen vuosineljännes (1, 2, 3, 4). Dummy-muuttujat mukaan lukien selittäviä tekijöitä oli yhteensä 21 kpl. Ne korjuulohkot, joilla käytettiin osittain joukkokäsittelyä (5 avohakkuu- ja 5 harvennuslohkoa), jätettiin pois ajanmenekin mallinnusaineistosta. Lisäksi hakkuutähteen kasoihin prosessoinnin vaikutusta tehoajanmenekkiin selvitettiin erikseen seitsemän koneen hakkaamassa 147 kuusivaltaisen avohakkuulohkon muodostamassa aineistossa (ks. taulukko 3).

Selittäjien parametriset vaikutukset prosessoinnin tehoajanmenekkiin arvioitiin support vector machine -mallilla (SVM, suom. tukivektorikone, Vapnik 1995, 1998), tarkemmin ns. support vector regression -mallilla (SVR, lineaari kerneli mySVM, Rüping 2000). SVM on joukko koneoppimismenetelmiä, joita käytetään ohjatussa, puoliohjatussa ja ohjaamattomassa oppimisessä (supervised, semi-supervised, unsupervised learning). SVM-mallin parametrit (C, epsilon) arvioitiin 10-kertaisella ristiinvalidoinnilla (Kohavi 1995). Lineaarisissa SVM-malleissa selittävän tekijän tärkeyttä ja relevanssia mitattiin Lagrangen kertoimella (Wang ym. 2017).

Hakkuun prosessoinnin tehoajanmenekin säännönmukaisuudet tunnistettiin gradient boosted machines -mallilla (GBM, Friedman 2001). Myös GBM-mallin parametrit arvioitiin 10-kertaisella ristiinvalidoinnilla (Kohavi 1995), jonka tavoitteena oli välttää mallin ali- ja ylisovittuminen aineistoon sekä parantaa mallin ennustekykyä uudella aineistolla. GBM-malli arvioi aineiston säännönmukaisuuksia visuaalisesti (pattern recognition). GBM-mallit esitetään pisteparvikuvina, joissa pisteet edustavat selitettävien muuttujien (tuottavuus tai polttoaineenkulutus) ennustettuja arvoja havaituilla korjuulohkokohtaisilla keskitilavuuksilla. Pisteiden hajonta kuvaa muiden parametrien vaikutusta ennustettuun vastemuuttujaan. Koneoppimismenetelmissä ei oleteta muuttujien riippumatta, joten mallien selitysasteet ovat yleensä korkeampia kuin perinteisten tilastollisten mallien.

Aineiston esikäsittelyvaiheessa selitettävä muuttuja (prosessoinnin tehoajanmenekki) muunnettiin logaritmiseksi (ln + 1) vaihtelun tasoittamiseksi. Aineiston dummy-koodatut (0, 1) selittäjät (alue, hakkuutapa, alustakoneen ja hakkuulaitteen kokoluokka, pääpuulaji, vuosineljännes) sekä jatkuvat selittäjät (puutavaralajien lukumäärä, rungon keskikoko) normalisoitiin (keskiarvo 0, varianssi 1), jotta selittäjien vaikutusten vertailu olisi mahdollista. Normalisointi toteutettiin 10-kertaisen ristiinvalidointisilmukan sisällä siten, että testinäytteet normalisoitiin vasta testausvaiheessa. Aineiston tilastollinen analyysi toteutettiin RapidMiner-ohjelmalla (versio 8.1.000, Mierswa et al. 2006).

2.5.3. Polttoaineen ja kantokäsittelyliuoksen kulutuksen mallitus

John Deeren ja Ponssen ajanseurantatiedostoihin sisältyi tietoa myös polttoaineenkulutuksesta muuttujan 316 (RUNTIME) työjaksoille (työlajeille) kohdistettuna. Kuten ajanmenekin mallinnukses-

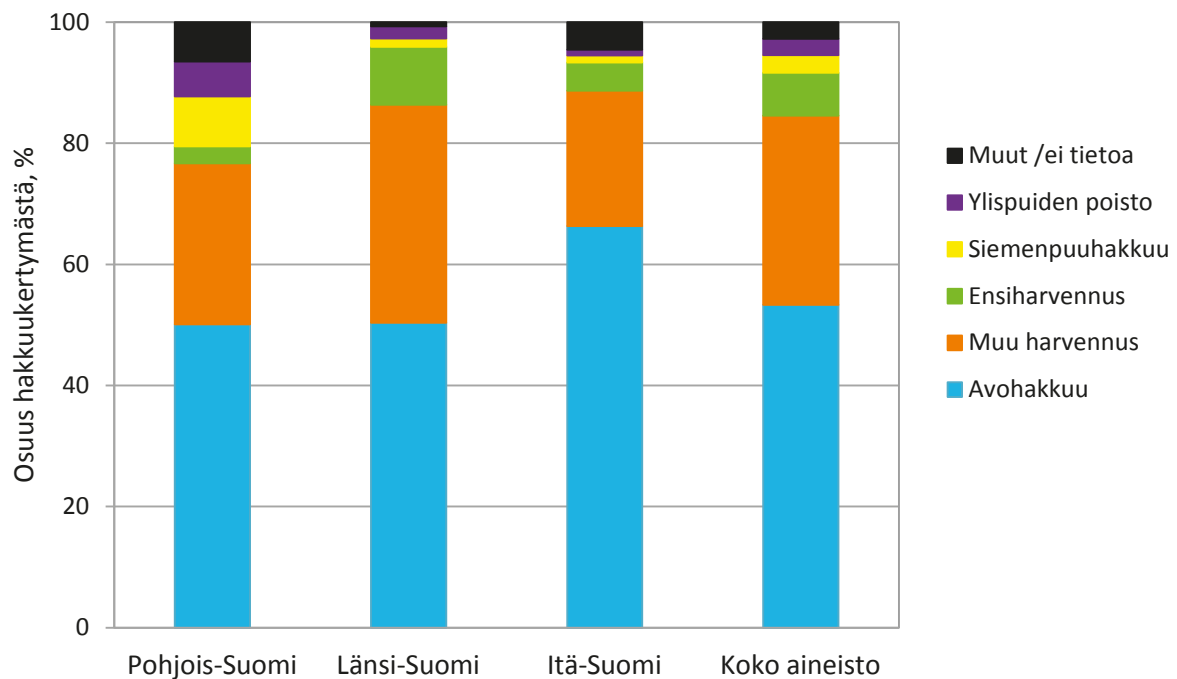
sakin, selittäjien parametriset vaikutukset polttoaineenkulutukseen tunnistettiin SVM-mallilla ja kulutuksen käyttäytymistä kuvattiin GBM-mallilla hyödyntäen samoja selittäviä muuttujia kuin prosessin tehoajanmenekin mallinnuksessa. Tuotantoajan polttoaineenkulutusta hakattua kuutiometriä kohti selvitettiin John Deere – ja Ponsse-aineistossa. (Laskennallisesti tuotettuja E_{15} -aikoja ei voitu käyttää, koska ajanseurantatiedoissa olevat kulutuslukemat on laskettu alkuperäisten katkosuodatusaikojen mukaan). Koska useat satunnaiset tekijät vaikuttavat tuotantoajan polttoaineenkulutukseen, rinnalla tarkasteltiin prosessoinnin E_0 -ajan polttoaineenkuluusta John Deere -aineistossa. Lisäksi tuotantoajan polttoaineenkulutukselle laadittiin tilastollinen regressiomalli. Myös kantokäsittelyliuoksen kulutus mallinnettiin käyttäen regressioanalyysiä.

3. Tulokset

3.1. Korjuuolosuhteet

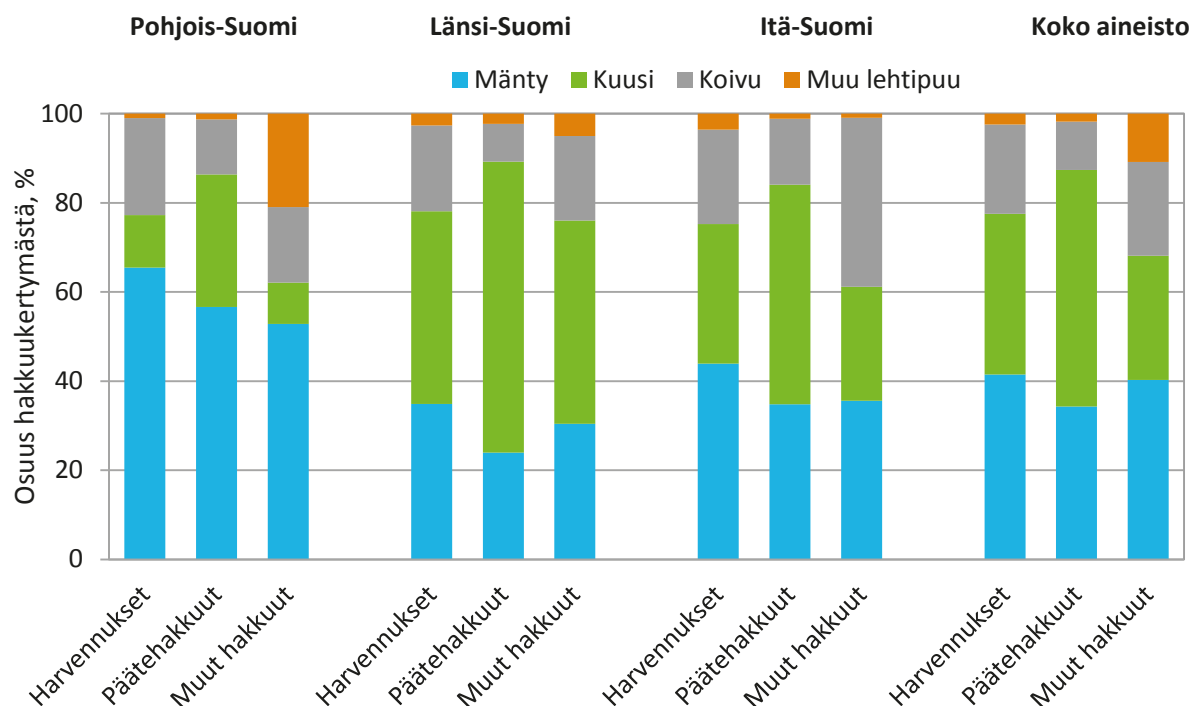
3.1.1. Hakkuutavat ja puulajisuhteet

Kaikilla alueilla vähintään puolet (50–66 %) hakkuukertymästä tuli avohakkuilta (kuva 6). Muiden kuin ensiharvennusten osuus oli 22–36 % ja ensiharvennusten ainoastaan 3–10 %. Siemenpuuhakkuut olivat yleisimpiä Pohjois-Suomessa, jossa niiden osuus oli 8 % hakkuukertymästä.



Kuva 6. Hakkuutapojen osuudet hakkuukertymistä alueittain.

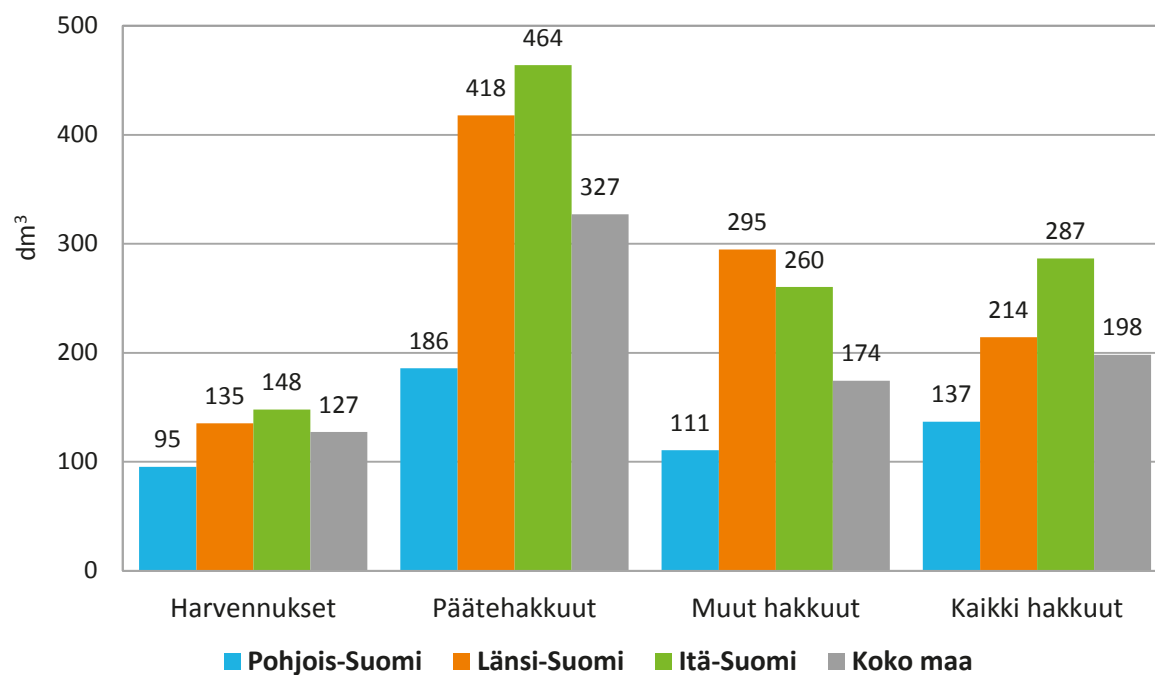
Mänty oli vallitseva puulaji Pohjois-Suomessa, jossa sen osuus hakkuukertymästä oli 59 %. Länsi- ja Itä-Suomessa puulajisuhteet olivat tasaisemmat, ja 43–54 % kertymästä koostui kuusesta (kuva 7).



Kuva 7. Puulajien osuudet hakkuukertymästä (m³) alueittain ja hakkuutaparyhmittäin.

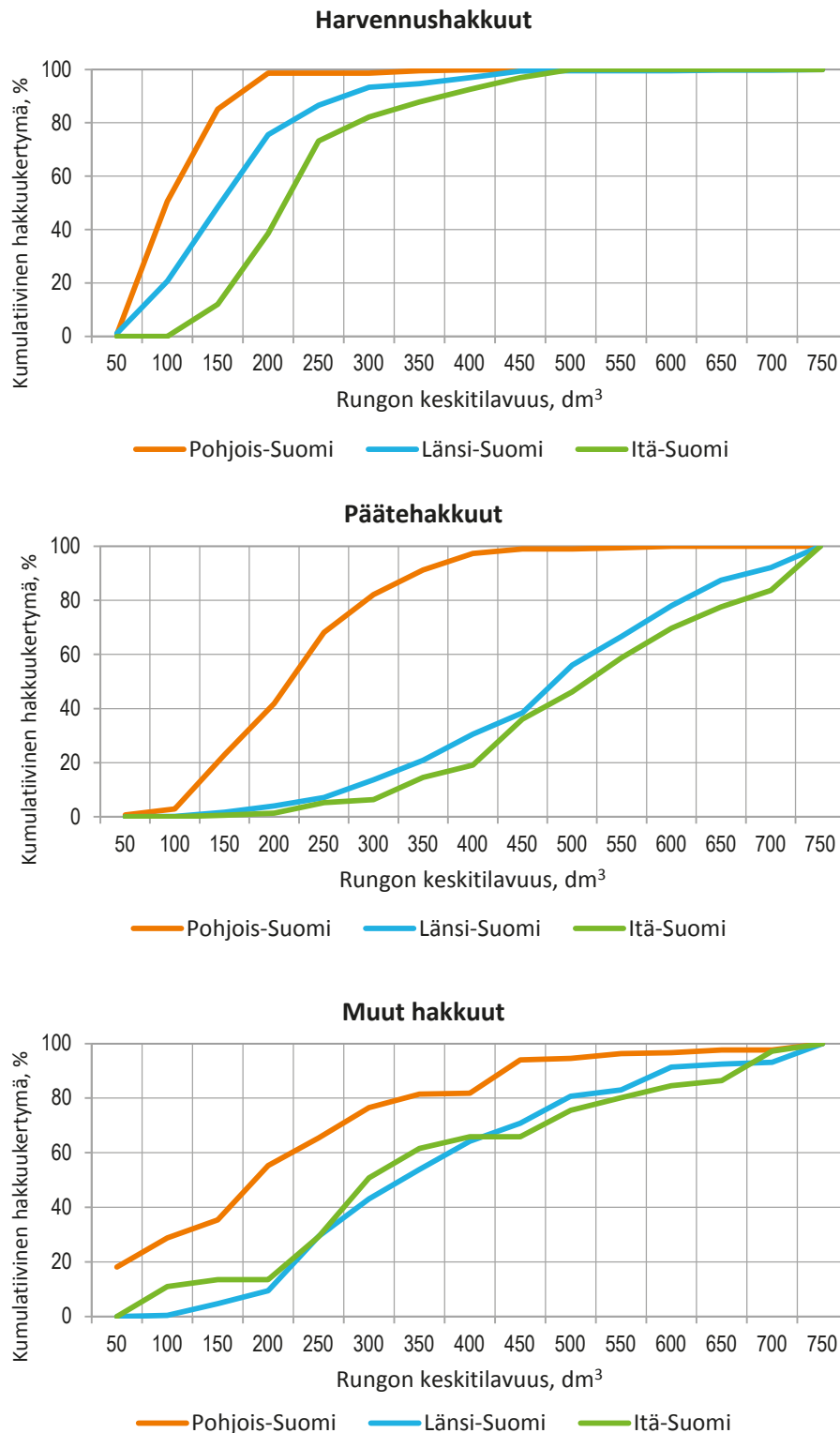
3.1.2. Rungon koko

Rungon keskimääräinen tilavuus koko aineistossa oli 198 dm³. Keskitilavuus oli Pohjois-Suomessa huomattavasti pienempi kuin Länsi- ja Itä-Suomessa (kuva 8). Ero oli suurin avohakkuilla, joilla rungon keskitilavuudet olivat Länsi- ja Itä-Suomessa 2,2–2,5-kertaisia Pohjois-Suomeen verrattuna. Harvennuksillakin keskitilavuudet olivat Länsi- ja Itä-Suomessa 30–36 % suurempia kuin Pohjois-Suomessa. Keskimääräiset runkotilavuudet on esitetty alueittain ja hakkuutavoittain liitteessä 1.



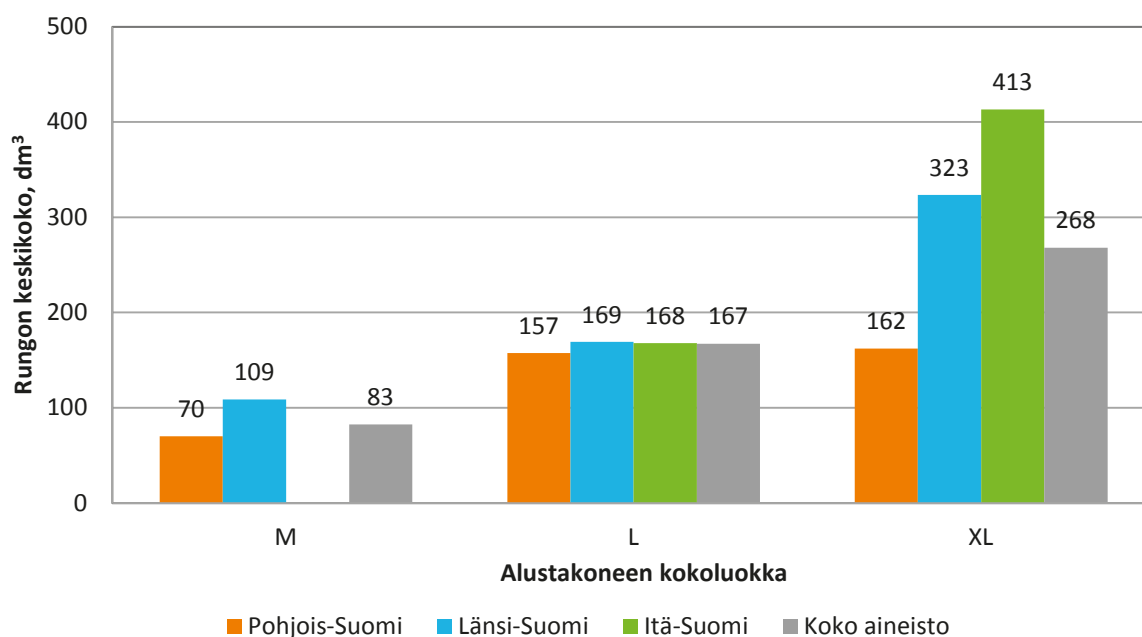
Kuva 8. Rungon keskitilavuudet hakkuutaparyhmittäin ja alueittain.

Kuva 9 esittää alueittaisia ja hakkuutapaluokittaisia kumulatiivisia hakkuukertymiä rungon keskitilavuuden mukaan. Pohjois-Suomen harvennuksilla noin puolet hakkuukertymästä tuli korjuulohkoilta, joilla rungon keskitilavuus oli korkeintaan 100 dm³, kun Länsi- ja Itä-Suomessa vastaavat runkotilavuudet olivat noin 150 ja 215 dm³. Puolet Pohjois-Suomen päätehakkuuiden kertymästä hakattiin kohteilta, joilla runkotilavuus oli alle 215 dm³. Muilla alueilla vastaavat runkotilavuudet olivat noin 480 ja 515 dm³.

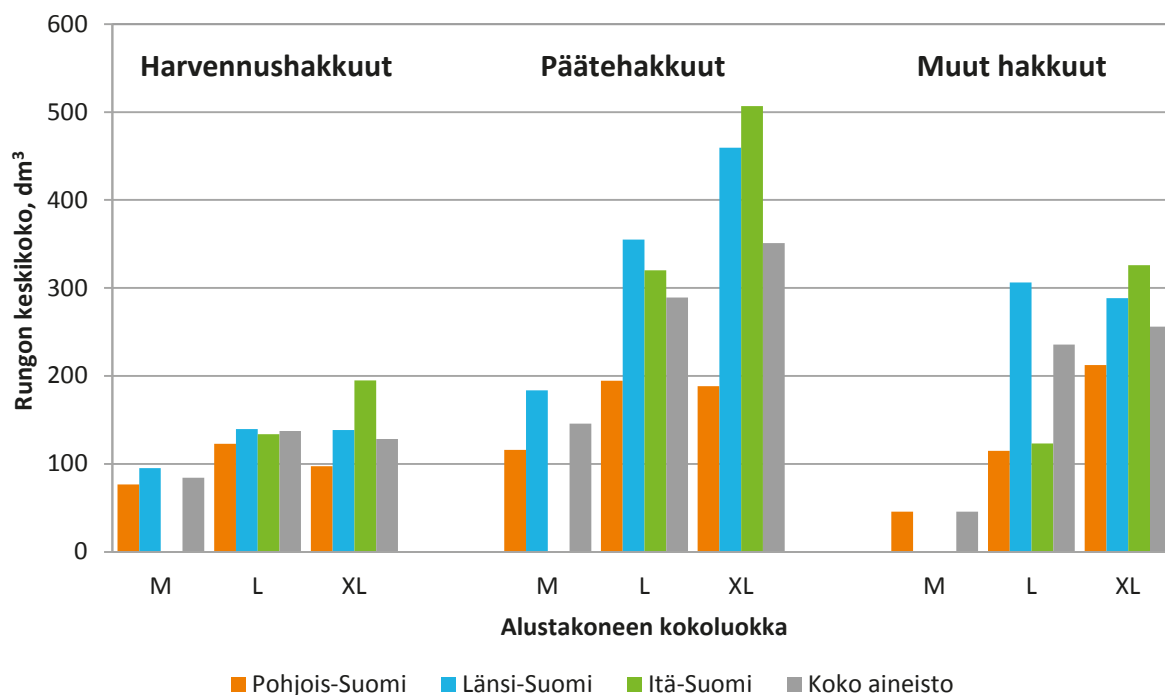


Kuva 9. Kumulatiiviset hakkuukertymät rungon keskitilavuuden mukaan hakkuutapaluokittain ja alueittain.

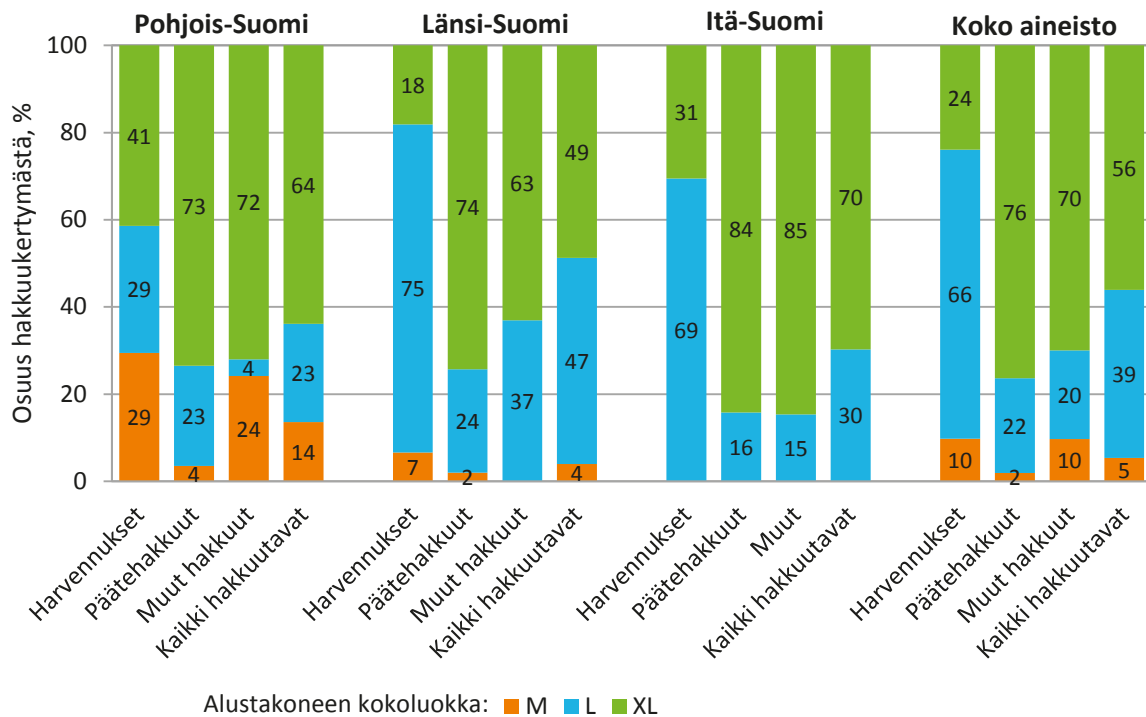
Suurille koneille valikoitui järeäpuustoisempia hakkuukohteita kuin pienemmille (kuva 10). Pohjois-Suomen päätehakkuilla käytettiin puuston kokoon nähden suurempia koneita kuin muilla alueilla (kuva 11). Yksittäisillä koneilla rungon keskitilavuus vaihteli 70:n ja 467 dm³:n välillä. Rungon keskitilavuuden vaihtelu oli suurinta XL-kokoluokan koneilla, joilla konekohtainen keskiarvo oli 125–437 dm³. Harvennuskertymästä suurin osa hakattiin L-kokoluokan koneilla, kun päätehakkuilla käytettiin yleisimmin XL-kokoluokan koneita (kuva 12). Harvennuksilla käytettiin yleisimmin L-kokoluokan koneita. Aineistossa oli vain kaksi M-kokoluokan konetta, ja niitä käytettiin pääasiassa harvennuksilla.



Kuva 10. Rungon keskitilavuudet koneen kokoluokittain ja alueittain, kaikki hakkuutavat.



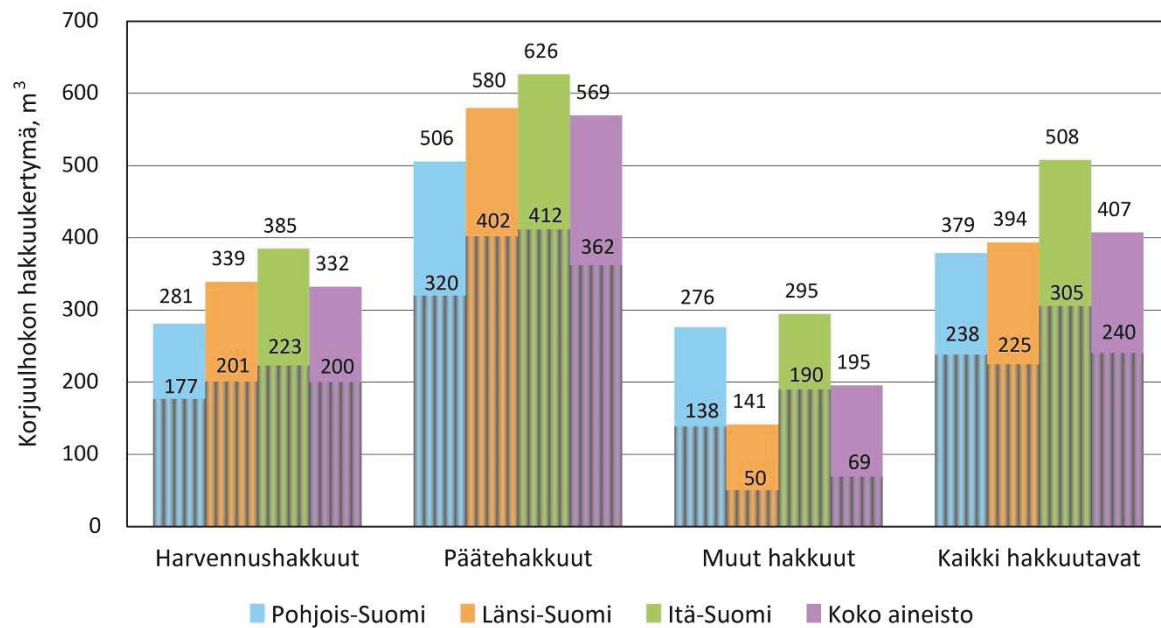
Kuva 11. Rungon keskitilavuus alueittain, alustakoneen kokoluokittain ja hakkuutaparyhmittäin.



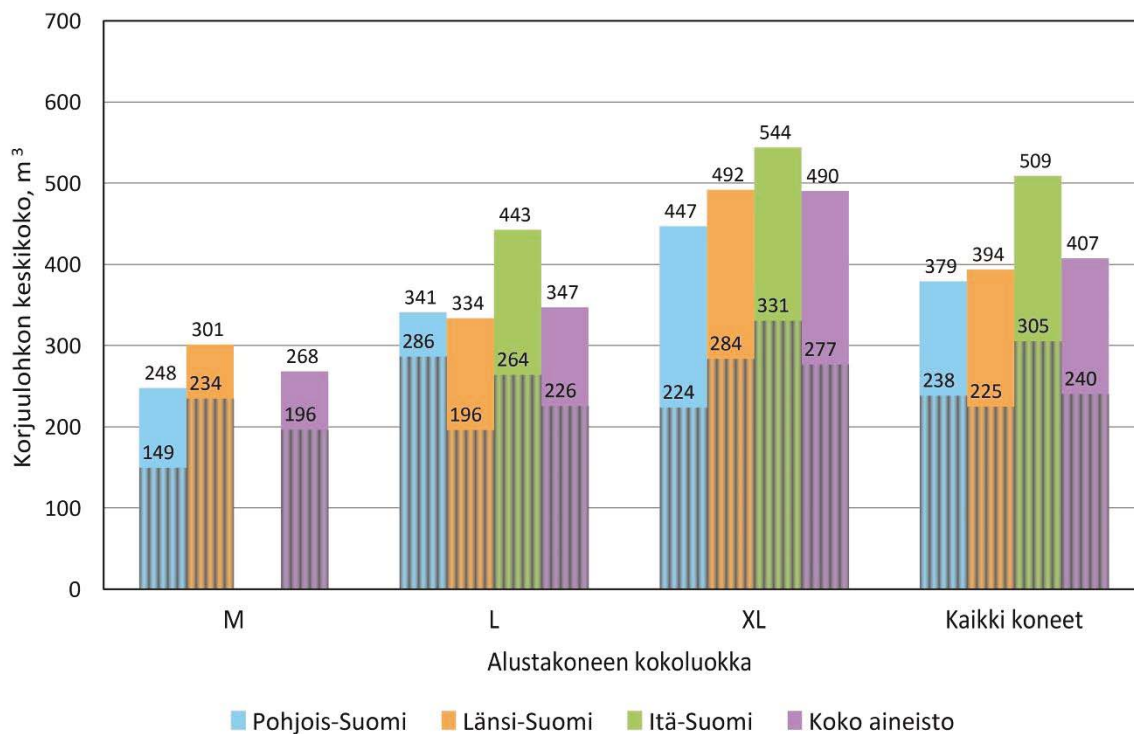
Kuva 12. Eri kokoluokkien hakkuukoneiden käyttö hakkuutapaluokittain ja alueittain.

3.1.3. Korjuulohkon koko

Korjuulohkokokohtainen hakkuukertymä oli koko aineistossa keskimäärin 407 m³ (liite 1), mutta vaihtelu oli suurta. Pienin yksittäiselle korjuulohkolle rekisteröity kertymä oli 0,3 m³ ja suurin 4 639 m³. Itä-Suomessa lohkot olivat hakkuukertymällä mitattuna keskimäärin noin kolmanneksen suurempia kuin Pohjois- ja Länsi-Suomessa (kuva 13). Konekohtainen korjuulohkon keskikoko vaihteli 236:n ja 1074 m³:n välillä. Suurilla koneilla myös korjuulohkot olivat hakkuukertymällä mitattuna pääsääntöisesti suurempia kuin pienemmillä koneilla (kuva 14).



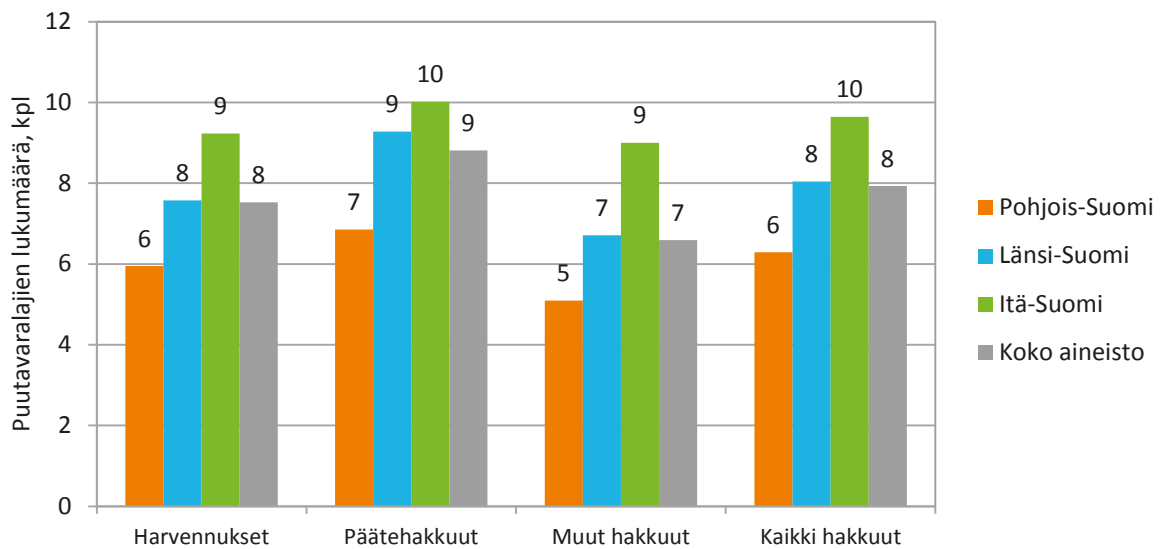
Kuva 13. Korjuulohkon keskimääräiset hakkuukertymät ja hakkuukertymän mediaanit (viivoitetut pylväään osat) hakkuutaparyhmittäin ja alueittain.



Kuva 14. Korjuulohkon hakkuukertymän keskiarvot ja mediaanit (viivoitetut pylväään osat) alustakoneiden kokoluokittain ja alueittain.

3.1.4. Puutavaralajien lukumäärä

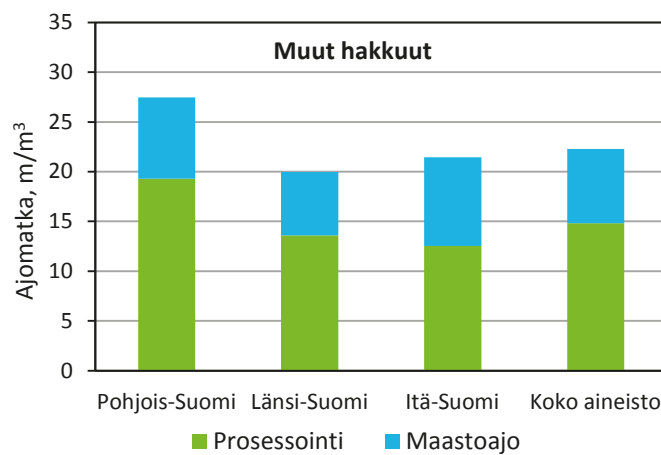
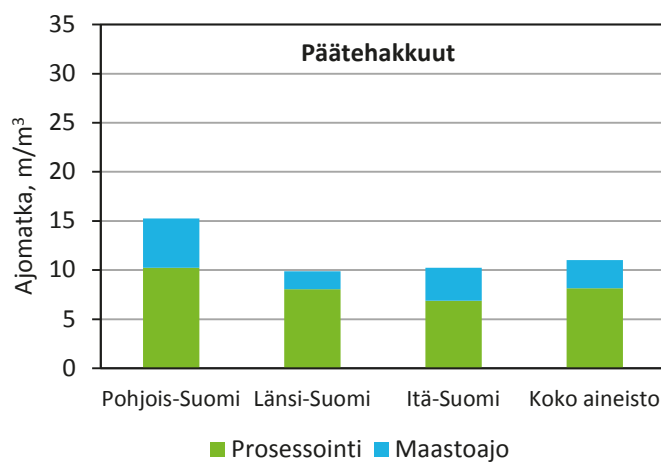
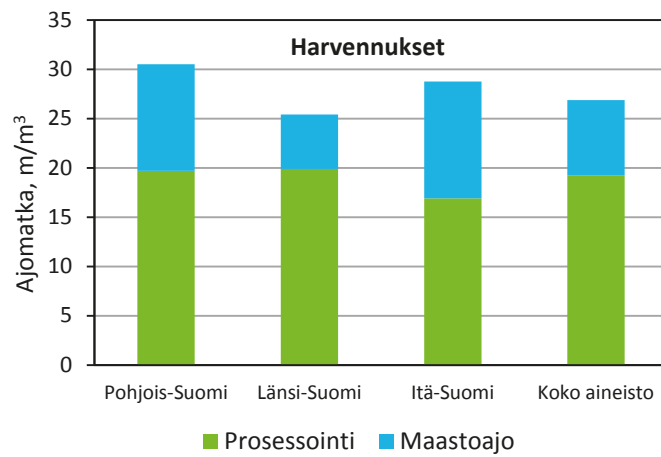
Korjuulohkolla tehtiin keskimäärin 7,9:ää puutavaralajia (1–16 ptl, keskihajonta 2,6 ptl). Harvennuk-silla keskimääräinen lohko-kohtainen puutavaralajien lukumäärä oli 7,5, päätehakuilla 8,8 ja muilla hakkuutavoilla 6,6 (kuva 15). Itä-Suomessa rungot katkottiin kaikissa hakkuutaparyhmissä useam-maksi puutavaralajiksi kuin muilla alueilla.



Kuva 15. Keskimääräiset lohko-kohtaiset puutavaralajien lukumäärät alueittain ja hakkuutaparyhmittäin.

3.1.5. Ajomatkat ja -nopeudet

Harvennuksilla tehoajalle (E_0) rekisteröitynyttä ajomatkaa kertyi kuutiometriä kohti noin 2,4-kertaisesti päätehakkuihin verrattuna (27 vs. 11 m/m³, kuva 16). Koneen kulkema matka jakaantui prosessoinniksi ja maastoajoksi rekisteröityneen ajan kesken likimain samassa suhteessa harvennus- ja päätehakuilla, ja alueiden väliset erot selittyivät lähinnä maastoajon määrällä. Osalle korjuulohkoja ei ollut rekisteröitynyt lainkaan maastoajoa.



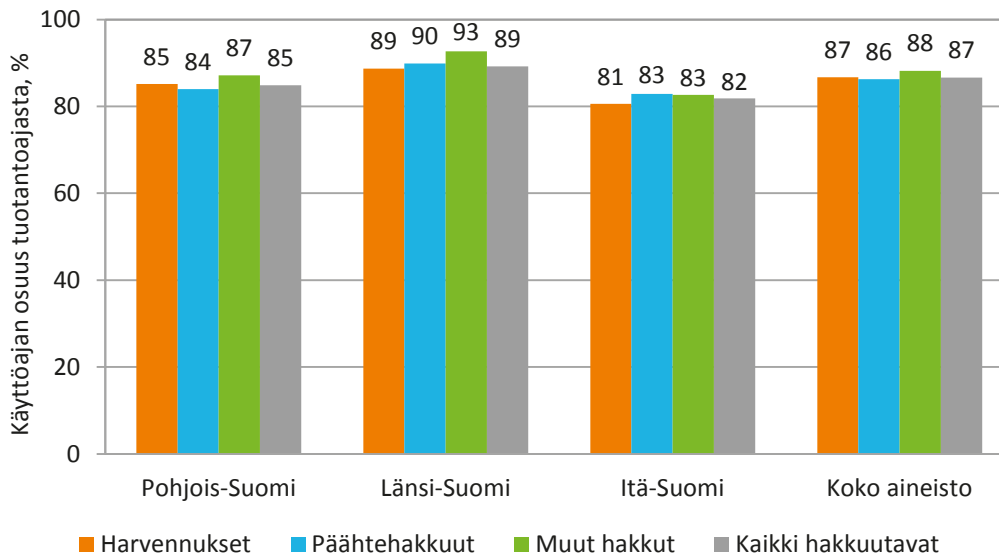
Kuva 16. Hakkuukoneiden kulkemat keskimääräisen matkat (m) hakattua kuutiometriä kohti sekä ajomatkan jakaantuminen prosessoinniksi ja maastoajoksi rekisteröityneen E₀-ajan kesken John Deere -aineistossa.

Keskimääräinen maastoajonopeus oli koko John Deere -aineistossa 17 m/min. Harvennuksilla se oli 16 m/min, pääte- ja muilla hakkuilla 19 m/min. Pohjois-Suomessa keskimääräinen maastoajonopeus oli 21 m/s, Länsi-Suomessa 20 ms ja Itä-Suomessa 13 m/s.

3.2. Ajankäyttö

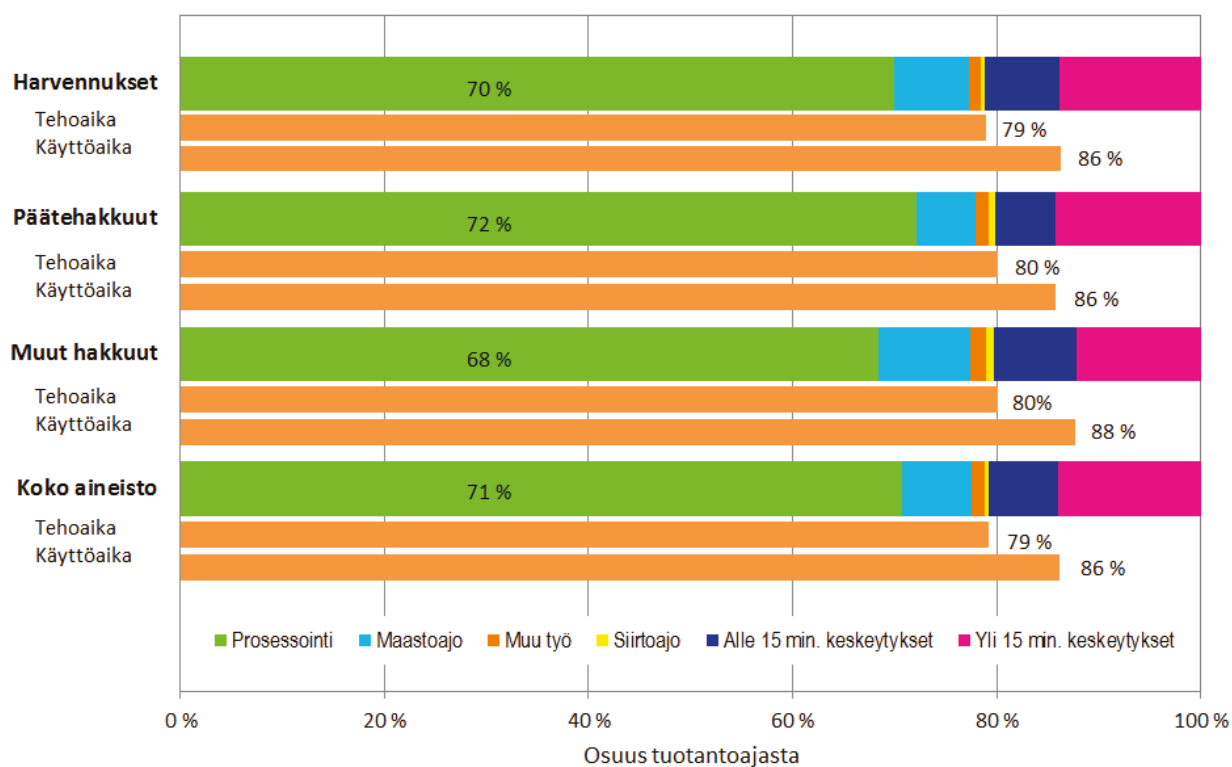
3.2.1. Ajankäytön rakenne

Prosessoinnin, maastoajon, muun työn, siirtoajon ja alle 15 minuutin keskeytykset sisältävän käyttöajan (E_{15}) osuus oli keskimäärin 87 % tuotantoajasta koko aineistossa (kuva 17). Tämä ajankäytön keskimääräinen suhdeluku oli kaikilla alueilla kahden prosenttiyksikön tarkkuudella sama harvennus- ja päätehakkuilla.



Kuva 17. Käyttöajan osuus tuotantoajasta alueittain ja hakkuutaparyhmittäin koko aineistossa. Käyttöaika (E_{15}) sisältää prosessoinnin, maastoajon, muun työn, siirtoajon ja alle 15 minuutin keskeytykset.

Tuotantoajan rakennetta voitiin tarkastella yksityiskohtaisemmin John Deere- ja Komatsu-aineistossa, joka sisältää E_0 -ajat työlajeittain (kuva 18). Hakkuutaparyhmästä riippuen 68–72 prosenttia tuotantoajasta rekisteröityi prosessoinniksi. Itä-Suomessa prosessoinnin suhteellinen osuus tuotantoajasta oli pienin kaikissa hakkuutaparyhmissä (taulukko 5).



Kuva 18. Tuotantoajan rakenne hakutavoittain John Deere- ja Komatsu-aineistossa.

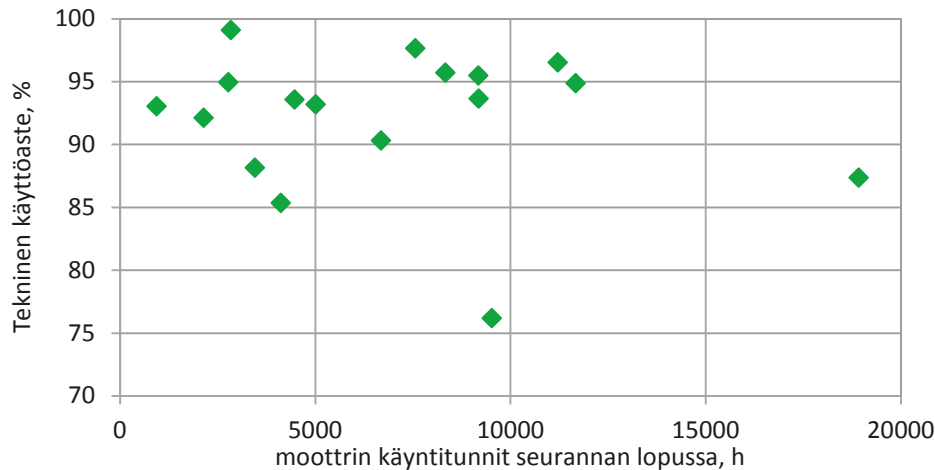
Taulukko 5. Tuotantoajan jakaantuminen tehoaikaan ja keskeytyksiin alueittain ja hakkuutaluokittain.

		Osuus tuotantoajasta, %					
		Käyttöaika					Yli 15 min. kesk.
		Tehoaika				Alle 15 min. kesk.	
		Prosessointi	Maastoajo	Muu työ	Siirto-ajo		
Pohjois-Suomi	Harvennukset	67,8	8,1	0,2	0,3	7,7	15,9
	Päätehakkuut	71,0	5,0	0,6	0,6	4,8	18,1
	Muut hakkuut	69,5	6,3	0,4	0,9	8,9	14,0
	Kaikki hakkuut	69,4	6,6	0,4	0,5	6,6	16,6
Länsi-Suomi	Harvennukset	75,1	4,5	0,7	0,4	7,9	11,4
	Päätehakkuut	78,2	5,5	0,4	0,3	5,9	9,7
	Muut hakkuut	72,7	9,9	1,9	0,6	7,9	7,0
	Kaikki hakkuut	76,0	5,1	0,6	0,4	7,3	10,6
Itä-Suomi	Harvennukset	56,4	15,1	3,6	0,6	4,9	19,4
	Päätehakkuut	64,3	7,1	3,6	0,9	7,0	17,1
	Muut hakkuut	58,3	13,1	3,4	1,2	6,6	17,4
	Kaikki hakkuut	60,3	11,1	3,6	0,8	6,0	18,2
Koko aineisto	Harvennukset	70,0	7,3	1,1	0,4	7,3	13,9
	Päätehakkuut	72,1	5,8	1,4	0,6	5,9	14,3
	Muut hakkuut	68,5	8,9	1,5	0,8	8,1	12,2
	Kaikki hakkuut	70,7	6,9	1,2	0,5	6,8	13,9

John Deere -aineiston perusteella koneilla työskenneltiin työvuorojen aikana keskimäärin 7,27 tuntia (keskihajonta 2,38 h), mutta tätä aikaa ei voitu kohdistaa korjuulohkoille niissä tapauksissa, joissa saman vuoron aikana hakattiin useampaa kuin yhtä lohkoa tai tehtiin jotakin muuta lohkolle kohdistumatonta työtä. Korjuulohkoille kirjautuneen tuotantoajan osuus oli keskimäärin 73 % koneen työajasta, ja osuus kasvoi korjuulohkon hakkuukertymän lisääntyessä ($r = 0,385$, $p < 0,001$). Muu aika voi sisältää korjuulohkolle kohdistumattoman työn ja koneen siirtojen lisäksi mm. kuljettajien ruokataukoja.

3.2.2. Käyttöasteet

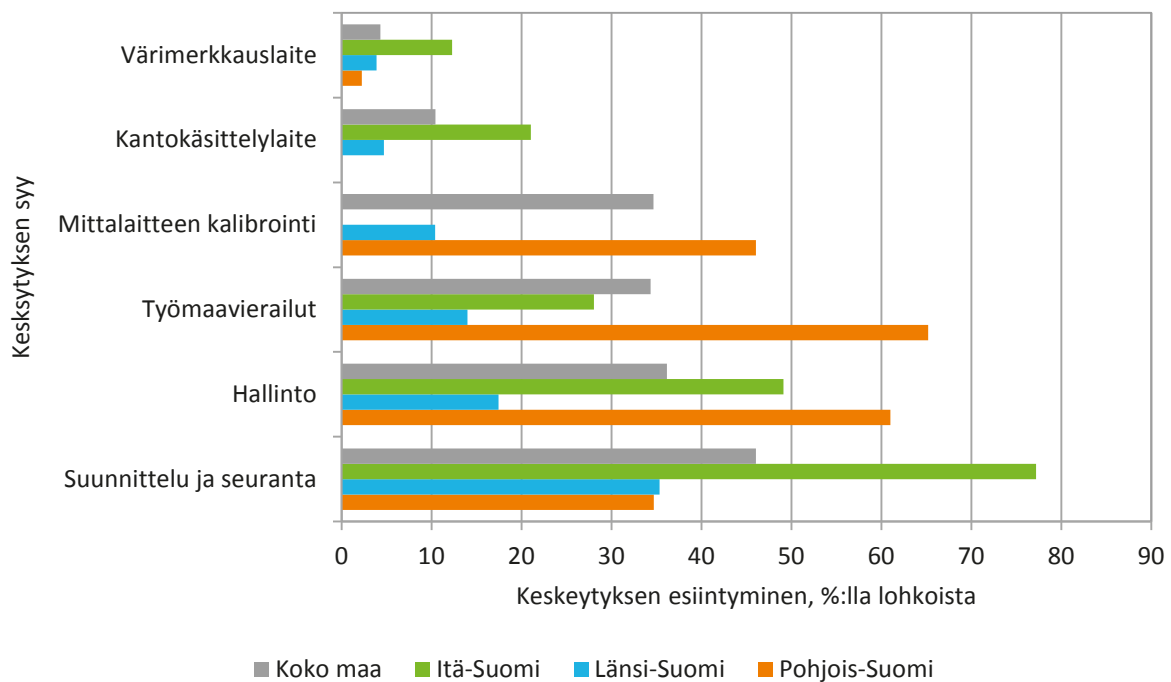
Hakkuukoneiden yhteenlasketun ajankäytön perusteella laskettu tekninen käyttöaste oli keskimäärin 90 %. Yksittäisten koneiden keskiarvo oli samaa luokkaa (keskiarvo 91 %, vaihteluväli 76–99 %, keskihajonta 5 %-yksikköä). Koneen käyttötuntien määrällä ei ollut juuri vaikutusta tekniseen käyttöasteeseen (kuva 19). Toiminnallinen käyttöaste oli edellä kuvatulla tavalla laskettuna 81 %, mutta tulokseen liittyy epävarmuutta puutteellisesti rekisteröityjen siirtojen vuoksi. Yksittäisten koneiden toiminnallisten käyttöasteiden keskiarvo oli 78 % (47–91 %, keskihajonta 13 %-yksikköä).



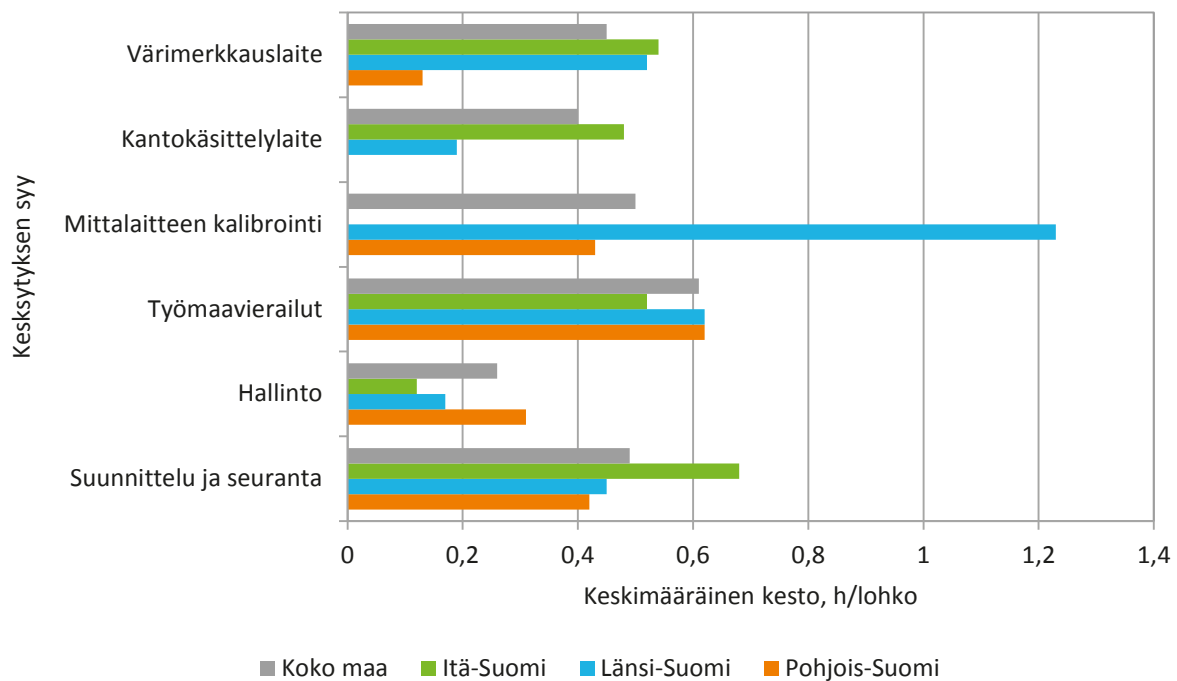
Kuva 19. Hakkuukoneiden tekninen käyttöaste.

3.2.3. Lisätöiden ajanmenekki

Suunnittelu ja seuranta sekä hallinnolliset tehtävät olivat tyypillisimpiä keskeytyksen aiheuttajia erikseen seuratuista työlajeista (kuva 20). Suunnittelua ja seurantaa oli rekisteröity 46 prosentille niitä seuranneiden koneiden korjuulohkoista ja hallintotehtäviä 36 prosentille. Mittalaitteen kalibrointi esiintyi 35 prosentilla niitä rekisteröineiden koneiden (2 kpl) korjuulohkoista. Myös metsänomistajien ym. käynnit työmaalla keskeyttivät työn usein. Suunnittelu- ja seurantakeskeytysten kesto oli keskimäärin 29 min, hallinnollisten keskeytysten 17 min ja työmaavierailujen 37 min (kuva 21). Alle viisi minuuttia kestäneet katkokset eivät sisälly edellä esitettyihin lukuihin.



Kuva 20. Erikseen seurattujen keskeytyslajien rekisteröityminen niillä seurantakoneilla, joilla ko. tietoa kerättiin (ks. taulukko 4).



Kuva 21. Erikseen seurattujen keskeytysten keskimääräinen kesto lohkoa kohti niillä koneilla, joilla ko. tietoa kerättiin (ks. taulukko 3).

3.3. Hakkuun tuottavuus

3.3.1. Keskimääräiset tuottavuudet

Koko aineistossa hakkuun keskimääräinen käyttötuntituottavuus oli $17,3 \text{ m}^3/\text{E}_{15}\text{-h}$, ja tuotantoaika-tuottavuus oli noin 87 % käyttötuntituottavuudesta (taulukko 6). Keskimääräiset tuottavuudet olivat kaikilla hakkuutavoilla heikoimpia Pohjois-Suomessa, jossa puusto oli selvästi pienikokoisempaa kuin muualla maassa. Esitetyt käyttötuntituottavuudet eivät kuitenkaan täysin vastaa normaalia käyttötuntituottavuutta, koska E_{15} -aikoihin saattaa sisältyä viittätoista minuuttia pitempiä jaksoja muuta kuin varsinaista hakkuutyötä. Se voi olla siirtymisiä tienvarren ja leimikon välillä tai korjuulohkon osalta toiselle (maastoajo tai siirtoajo) tai muuksi työksi rekisteröityä aikaa.

Taulukko 6. Hakkuun käyttötunti- ja tuotantoaikatuoottavuudet koko aineistossa.

Hakkuutapa ja -alue	Hakkuu- kertymä, m³	Keskim. run- gon koko, dm³	Käyttötunti- tuottavuus (E ₁₅)	Tuotantoaika- tuottavuus	Lohkojen lkm.
			m³/tunti		
Harvennukset					
Pohjois-Suomi	41 817	95	9,7	8,3	149
Länsi-Suomi	163 068	135	12,6	11,2	481
Itä-Suomi	31 821	148	10,9	8,8	83
Koko aineisto	236 706	127	11,8	10,2	713
Päätehakkuut					
Pohjois-Suomi	83 462	186	19,5	16,4	165
Länsi-Suomi	184 955	418	30,3	27,2	319
Itä-Suomi	79 537	464	25,1	20,8	127
Koko aineisto	347 954	327	25,7	22,1	611
Muut hakkuut					
Pohjois-Suomi	16 835	111	13,3	11,6	61
Länsi-Suomi	18 510	295	20,8	19,3	131
Itä-Suomi	6 479	260	16,4	13,5	22
Koko aineisto	41 824	174	16,4	14,5	214
Kaikki hakkuut					
Pohjois-Suomi	142 114	137	14,4	12,3	375
Länsi-Suomi	366 533	214	18,4	16,4	931
Itä-Suomi	117 838	287	18,2	14,9	232
Koko aineisto	626 485	198	17,3	15,0	1 538

Tuotanto- ja käyttöaikatuoottavuuksien suhteet olivat samaa luokkaa myös John Deere- ja Komatsu-aineistossa, jossa voitiin edellä mainittujen tunnuslukujen lisäksi tarkastella tehotuntuottavuuksia (taulukko 7). Prosessoinnin (hakkuun) tehotuntuottavuus oli keskimäärin 21,9 m³/E₀-h. Kun huomioitiin myös muu E₀-ajaksi rekisteröitynyt työ (maastoajo, muu työ ja siirtoajo), keskimääräinen tehotuntuottavuus oli noin 11 % alempi. Hakkuutaparyhmien välillä ei ollut olennaisia eroja käyttötunti- ja tuotantoaikatuoottavuuksien suhteissa.

Taulukko 7. Hakkuun tuottavuudet John Deere- ja Komatsu- aineistossa.

Hakkuutapa ja alue	Hakkuu- kerty- mä, m ³	Keskim. rungon koko, dm ³	Tuottavuus				Lohkoja, kpl
			Proses- sointi- tuotta- vuus ¹	Tehotun- tutuotta- vuus ²	Käyttö- tuntituot- tavuus ³	Tuotanto- aikatuot- tavuus	
Harvennukset							
Pohjois-Suomi	3 5474	100	12,6	11,2	10,2	8,5	112
Länsi-Suomi	132 383	139	15,8	14,8	13,4	11,9	383
Itä-Suomi	31 821	148	15,6	11,7	10,9	8,8	83
Koko aineisto	199 678	131	15,1	13,4	12,3	10,6	578
Päätehakkuut							
Pohjois-Suomi	66 606	201	23,9	22,0	20,7	17,0	123
Länsi-Suomi	155 917	431	35,7	33,1	30,9	27,9	259
Itä-Suomi	79 537	464	32,4	27,4	25,1	20,8	127
Koko aineisto	302 060	349	31,4	28,4	26,4	22,7	509
Muut hakkuut							
Pohjois-Suomi	11 467	92	14,9	13,4	12,0	10,4	38
Länsi-Suomi	16 754	287	26,3	22,4	20,5	19,1	119
Itä-Suomi	6 479	260	23,2	17,8	16,4	13,5	22
Koko aineisto	34 701	167	20,6	17,7	16,0	14,1	179
Hakkuut keskim.							
Pohjois-Suomi	113 548	140	17,8	16,1	14,8	12,4	273
Länsi-Suomi	305 054	223	22,8	21,1	19,4	17,4	761
Itä-Suomi	117 838	287	24,7	19,7	18,2	14,9	232
Koko aineisto	536 440	207	21,9	19,5	18,0	15,5	1266

¹Prosessointiaikoihin sisältyy työpistesirrot, joten aika tulkitaan normaaliksi hakkuun E₀-ajaksi.

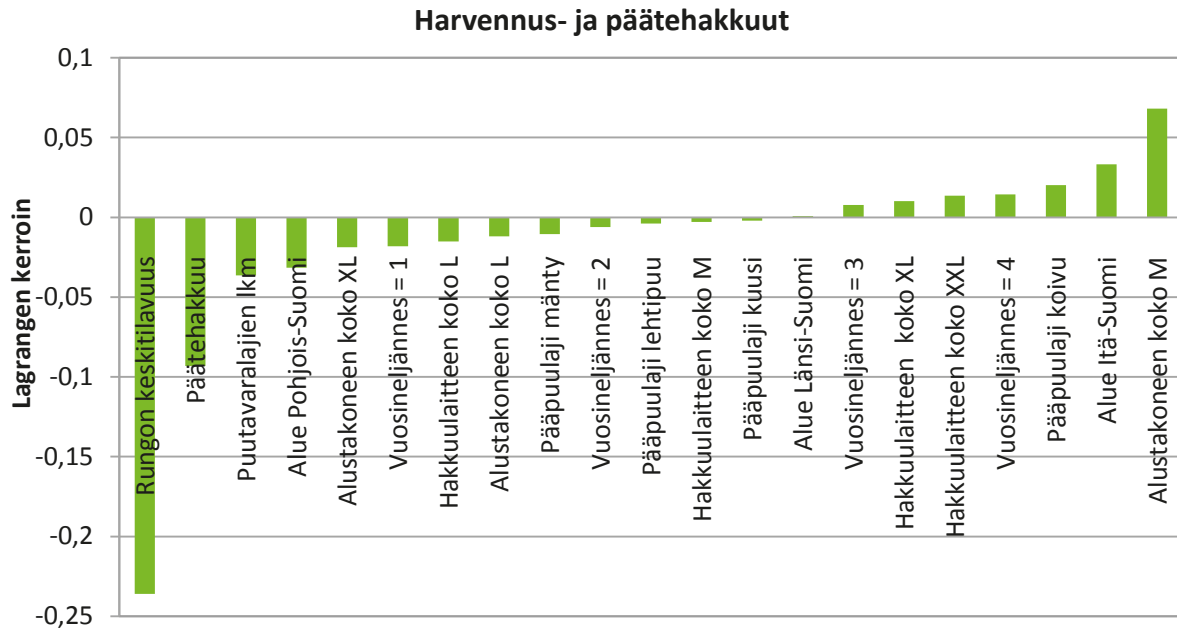
²Aika sisältää prosessoinnin, maastoajon, muun työn ja siirtoajojen E₀-ajat

³Aika sisältää prosessoinnin ja alle 15 minuutin keskeytysten lisäksi maastoajon, muun työn ja siirtoajat

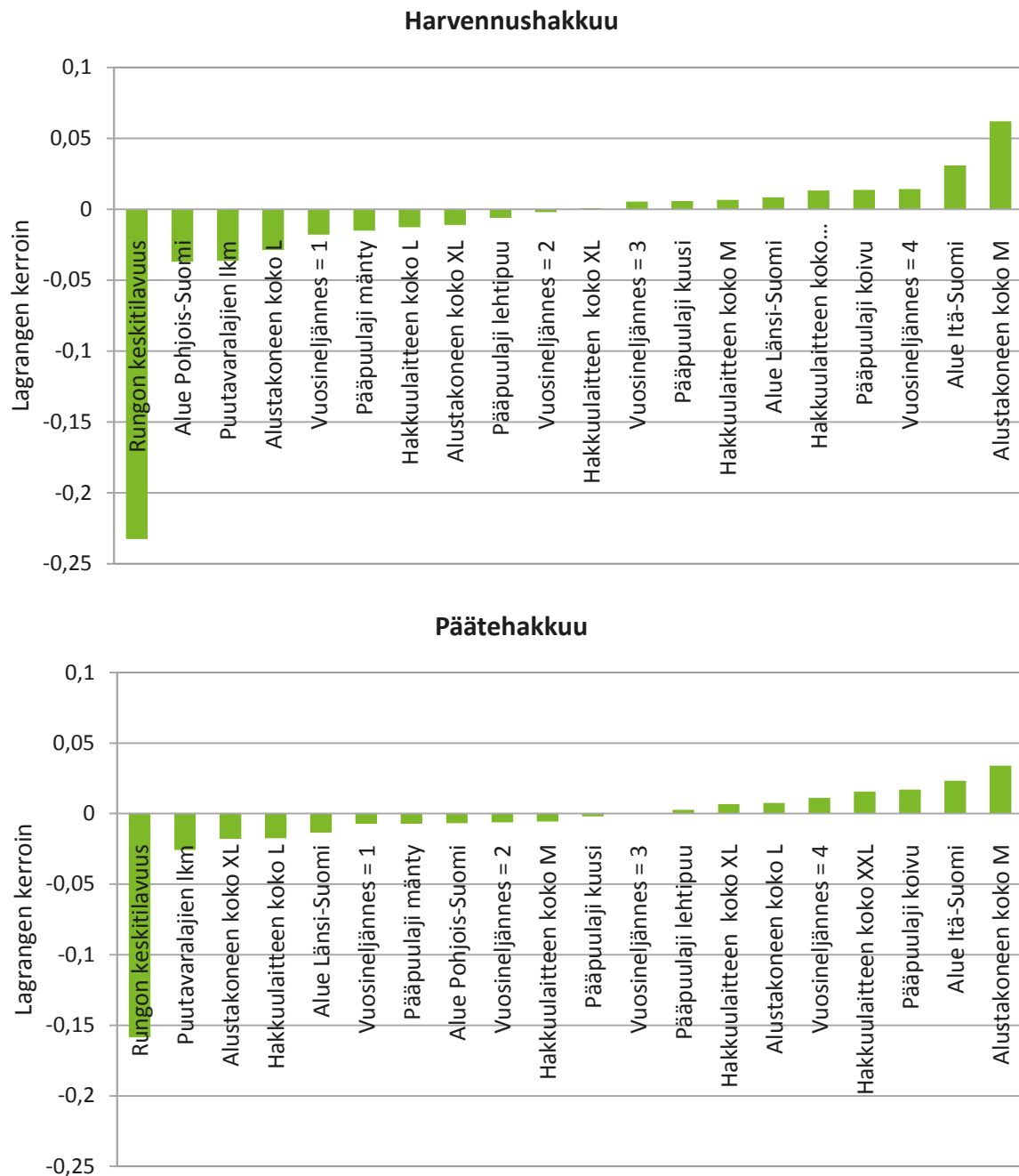
3.3.2. Hakkuun tuottavuuteen vaikuttavat tekijät

Rungon keskitilavuudella oli selvästi suurin vaikutus prosessoinnin (hakkuun) tehoajanmenekkiin hakattua kuutiometriä kohti, ja päätehakkuilla ajanmenekki oli pienempi kuin harvennuksilla (kuva 22). Puutavaralajien lukumäärän lisääntymisen hakkuuta hidastava vaikutus näkyi 6–7 puutavaralajiin saakka. Todennäköisesti samanaikainen rungon koon kasvu johti siihen, että puutavaralajien hakkuuta hidastavaa vaikutusta ei pystytty osoittamaan koko ajanmenekkiaineiston kattavassa tarkastelussa. Siemenpuuhakkuiden ajanmenekki ei poikennut avohakkuista. Eri muuttujien vaikutukset tehoajanmenekkiin olivat harvennus- ja päätehakkuilla samansuuntaisia, mutta rungon keskitilavuudella oli harvennuksilla suurempi vaikutus kuin päätehakkuilla (kuva 23). Tehoajanmenekki oli M-kokoluokan koneilla suurempi kuin isommilla koneilla sekä harvennus- että päätehakkuilla. Päätehakkuut sujuivat tehokkaimmin XL-kokoluokan koneilla, mutta harvennuksilla ajanmenekki oli pienempi L-kokoluokan koneilla. Suurimman, XXL-kokoluokan hakkuulaitteilla oli työtä hidastava vaikutus sekä harvennuksilla että päätehakkuilla. Itä-Suomessa prosessointi oli hitaampaa kuin muualla sekä harvennus- että päätehakkuilla, ja Pohjois-Suomi erottui edukseen harvennuksilla. Koivuval-

taisten puustojen prosessointi oli hitaampaa kuin muilla lohkoilla sekä harvennuksilla että päätehakkuilla. Työ oli ensimmäisellä ja toisella vuosineljänneksellä tehokkaampaa kuin vuoden jälkipuoliskolla.

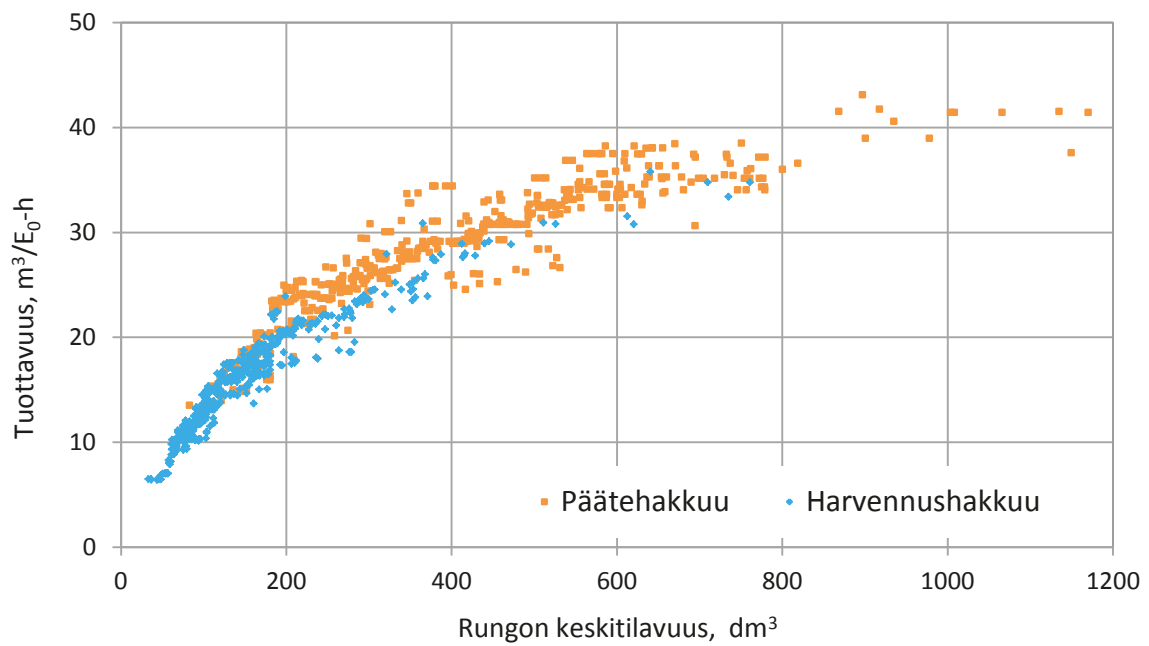


Kuva 22. Prosessoinnin (hakkuun) tehoajanmenekkiin (min/m^3) vaikuttavat tekijät harvennus- ja päätehakkuilla John Deere- ja Komatsu-aineistossa SVM-mallin mukaan (ks. luku 2.5.2). Lukuarvoltaan negatiiviset tekijät vähentävät ajanmenekkiä ja lisäävät tuottavuutta, positiivisten vaikutus on päinvastainen.

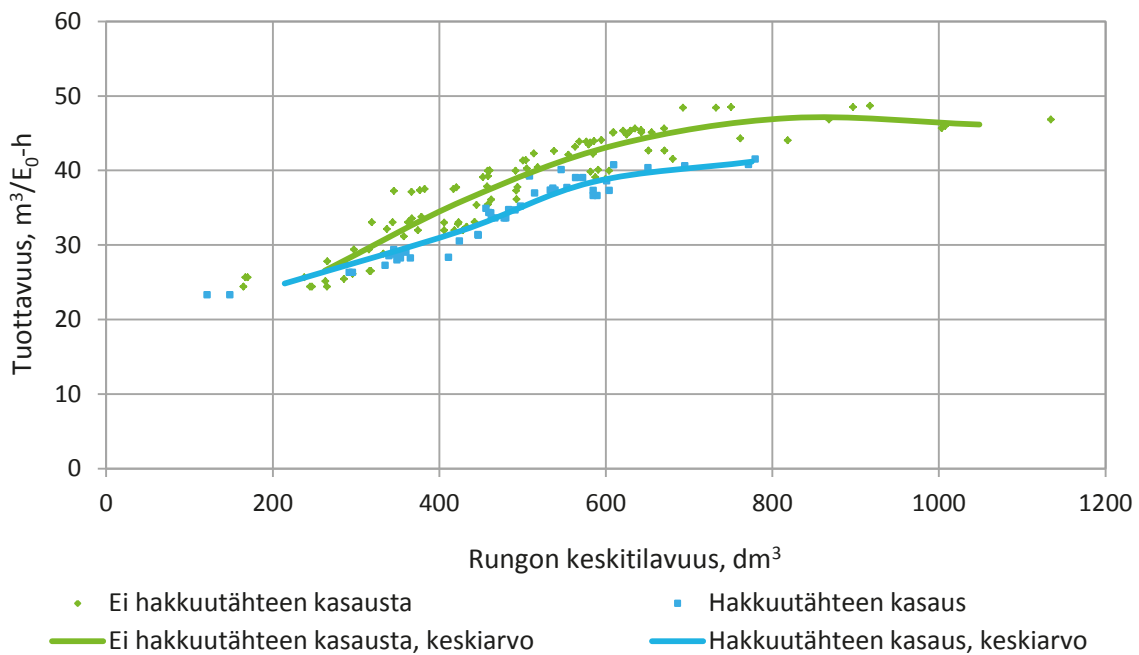


Kuva 23. Prosessoinnin (hakkuun) tehoajanmenekkiin vaikuttavat tekijät erikseen harvennus- ja päättehakuilla John Deere- ja Komatsu-aineistossa SVM-mallin mukaan. Lukuarvoltaan negatiiviset tekijät vähentävät ajanmenekkiä, positiiviset lisäävät.

Harvennus- ja päättehakkuiden tuottavuuksissa ei ollut kovin suurta eroa silloin, kun korjuulohkon keskimääräinen runkotilavuus jäi alle 200 dm³:n (kuva 24). Hakkuutähteen prosessointi kasoihin alensi avohakkuun tuottavuutta kuusivaltaisilla korjuulohkoilla keskimäärin noin 10 % (kuva 25).

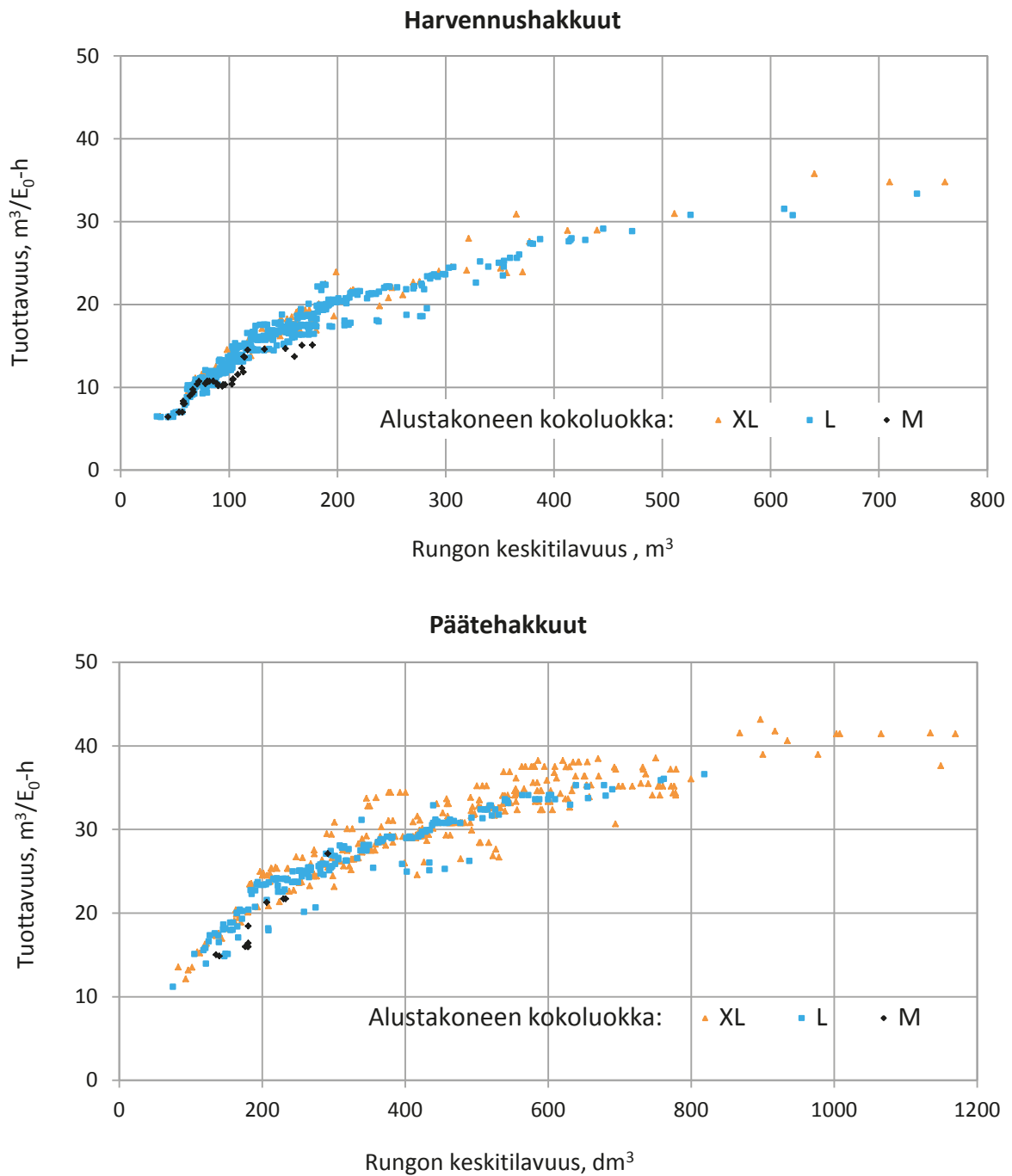


Kuva 24. Prosessoinnin (hakkuun) tehotuntuottavuus ($\text{m}^3/\text{E}_0\text{-h}$) harvennus- ja päätehakkuilla (GBM-malli, ks. luku 2.5.2).



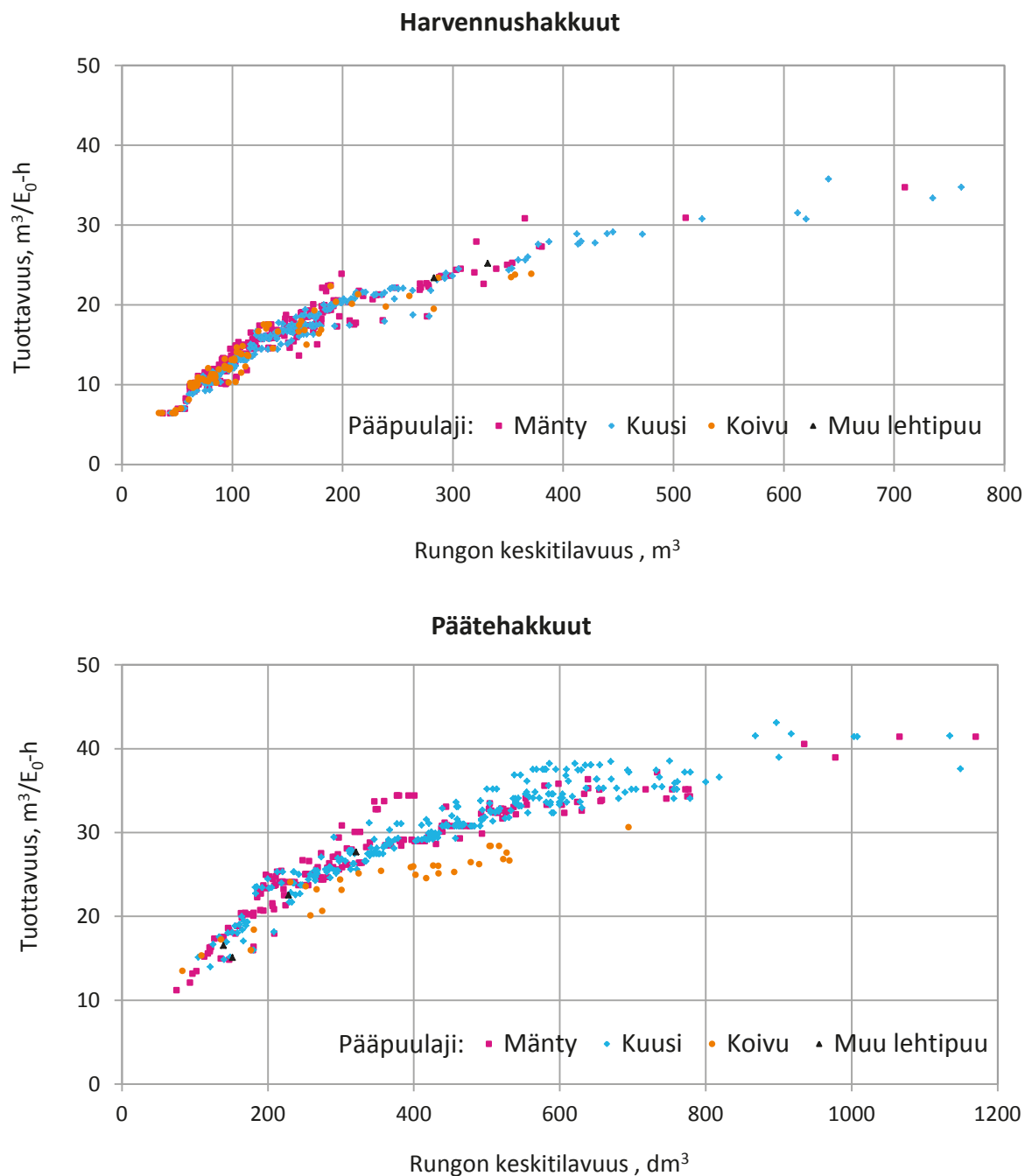
Kuva 25. Hakkuutähteen kasauksen vaikutus prosessoinnin (hakkuun) tuottavuuteen kuusivaltaisilla avohakkuulohkoilla (GBM-malli, ks. luku 2.5.2).

M-kokoluokan hakkuukonetta käytettiin lähinnä harvennushakkuilla, joilla sen tuottavuus oli pääsääntöisesti heikompi kuin isommilla koneilla (kuva 26). Päätehakkuilla XL-kokoiset koneet alkoivat erottua L-kokoluokan koneista, kun rungon keskikoko ylitti 300 dm^3 .



Kuva 26. Alustakoneen koon vaikutus prosessoinnin (hakkuun) tuottavuuteen harvennus- ja päättehakuilla John Deere- ja Komatsu-aineistossa (GBM-malli, ks. luku 2.5.2).

Pienikokoisilla rungoilla hakkuukertymän pääpuulaji ei juuri vaikuttanut prosessoinnin (hakkuun) tuottavuuteen, ja muutenkin puulajien väliset erot olivat pieniä (kuva 27). Koivuvaltaiset kohteet erottuivat selvimmin. Niillä tuottavuuden nousu taittui, kun rungon keskitilavuus ylitti $200 \text{ dm}^3\text{:n}$.



Kuva 27. Korjuulohkon pääpuulajin vaikutus hakkuun (prosessoinnin) tuottavuuteen John Deere- ja Komatsu-aineistossa (GBM-malleja, ks. luku 2.5.2).

3.4. Polttoaineenkulutus

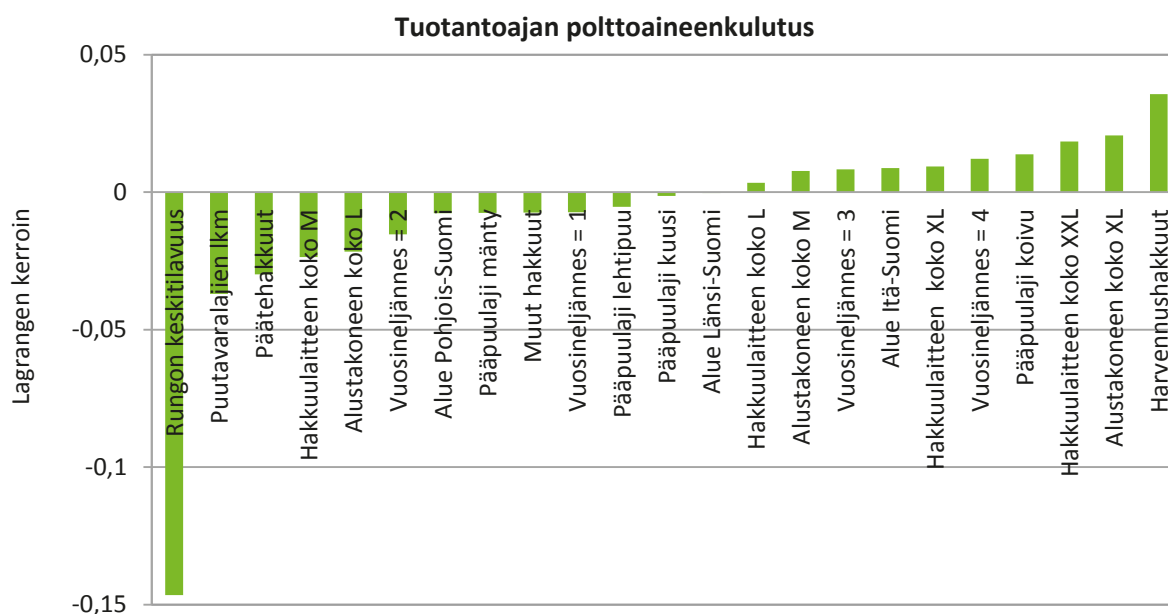
Keskimääräinen tuotantoajan polttoaineenkulutus koko John Deere - ja Ponsse-aineistossa oli $0,86 \text{ l/m}^3$ (rungon keskitilavuus 220 dm^3). Harvennuksilla se oli $1,18 \text{ l/m}^3$ (133 dm^3), päätehakuilla $0,69 \text{ l/m}^3$ (335 dm^3) ja muilla hakkuutavoilla $0,89 \text{ l/m}^3$ (246 dm^3).

John Deere -aineistossa pystyttiin erittelemään tuotantoajan polttoaineenkulutusta tarkemmin. Prosessoinnin E_0 -aikana kului 87 % käytetystä polttoaineesta, ja prosessoinnin osuus oli suurin päätehakkuilla. Maastoajan osuus oli noin 8 % tuotantoajan polttoaineenkulutuksesta.

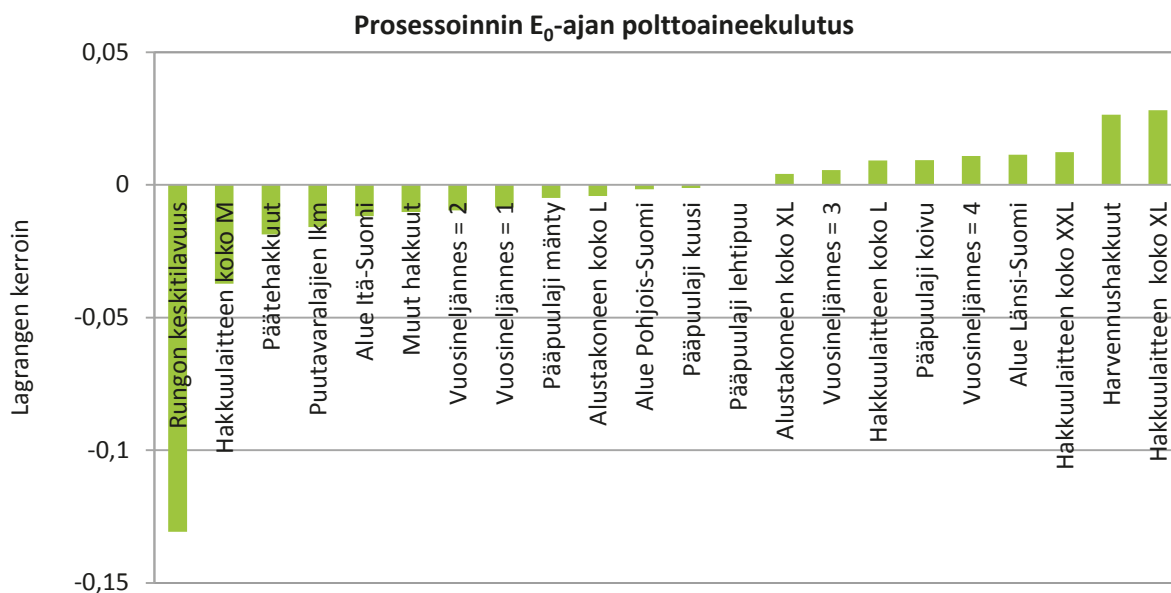
Taulukko 8. Taulukko 8. Polttoaineen suhteellinen kulutus työvaiheittain ja hakkuutaparyhmittäin John Deere -aineistossa.

Hakkuutaparyhmä	Osuus tuotantoajan polttoaineenkulutuksesta, %				
	Prosessointi	Maastoajo	Muu työ	Siirtoajo	Keskeytykset
Harvennukset	85,5	9,4	0,3	0,2	4,6
Päätehakkuut	88,9	6,7	0,2	0,2	4,0
Muut hakut	81,2	13,1	0,2	0,3	5,3
Kaikki hakkuut	87,0	8,3	0,2	0,2	4,4

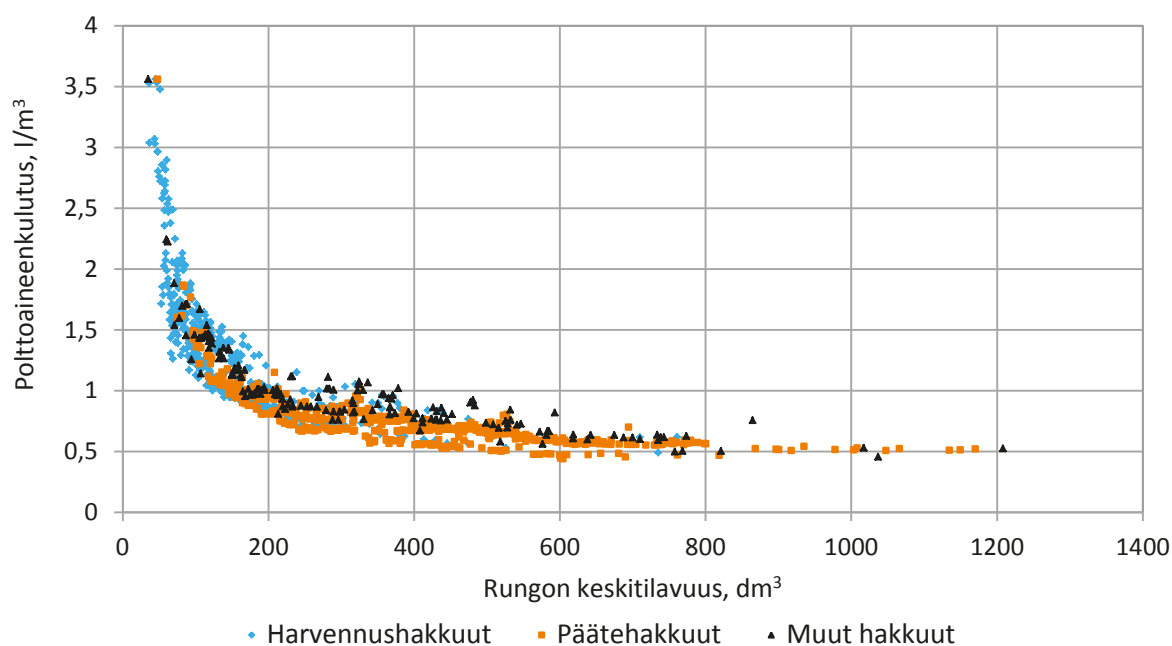
SVM-mallin mukaan rungon keskitilavuus ja hakkuutapa olivat tärkeimpiä selittäjiä sekä tuotantoajan että prosessoinninaikaiselle (E_0) polttoaineenkulutukselle (kuvat 28–29). Koivuvaltaisilla korjuulohkoilla kului enemmän polttoainetta kuin muilla lohkoilla. Valtaosa hakkuutaparyhmään ”muut hakkuut” kuuluvista hakkuista oli erilaisten linjojen avaamista ja ylispuiden poistohakkuista (Ponsse- ja John Deere -aineistossa 34 % ja 36 % korjuulohkoista), eikä polttoaineenkulutus näillä kohteilla poikennut juuri muista hakkuista alle 200 dm³:n runkotilavuuksilla (kuva 30). Sitä suuremmilla tilavuuksilla korjuulohkot ovat valtaosin ylispuiden poistohakkuista, joilla tuotantoajan polttoaineenkulutus oli suurempaa kuin harvennus- ja päätehakkuilla. Myös koivuvaltaisuuden polttoaineen kulutusta lisäävä vaikutus alkoi näkyä, kun rungon keskitilavuus ylitti 200 dm³:n (kuva 31). Suurten alustakoneiden ja hakkuulaitteiden käyttö lisäsivät polttoaineen kulutusta polttoaineen (kuvat 28–29, 32–33).



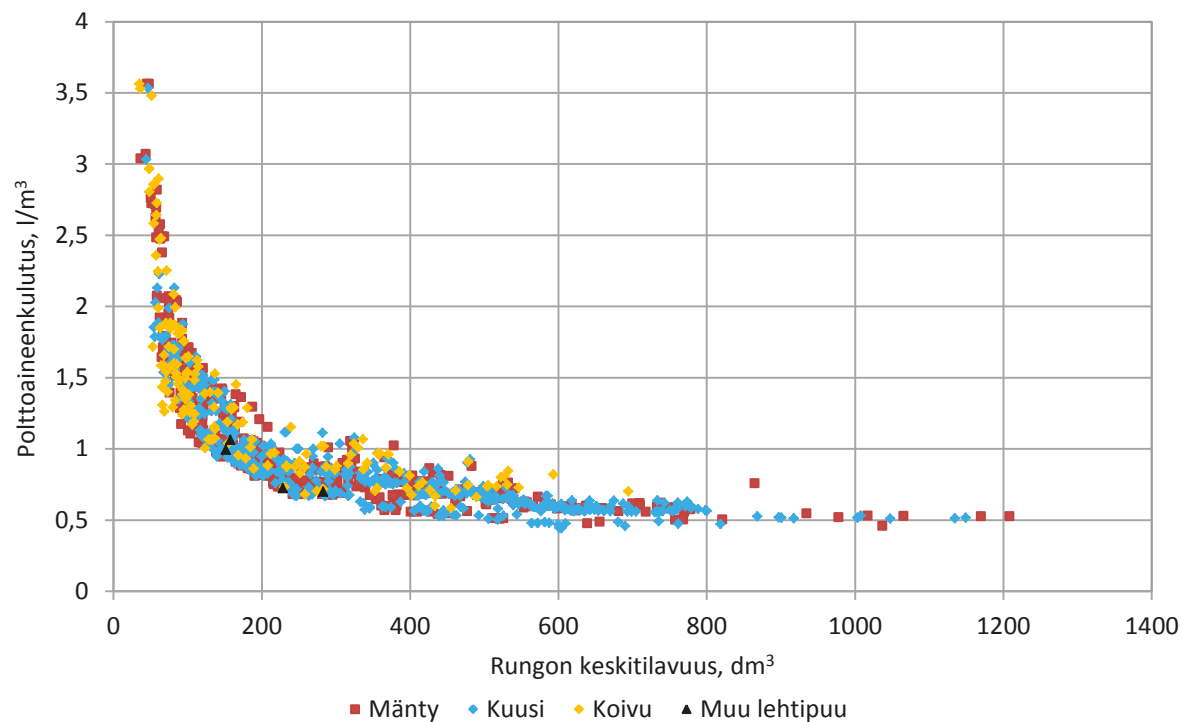
Kuva 28. Tuotantoajan polttoaineenkulutukseen (l/m³) vaikuttavat tekijät John Deere- ja Ponsse-aineistossa SVM-mallin mukaan (ks. luku 2.5.2). Lukuarvoltaan negatiiviset tekijät vähentävät polttoaineenkulutusta, positiivisilla on päinvastainen vaikutus.



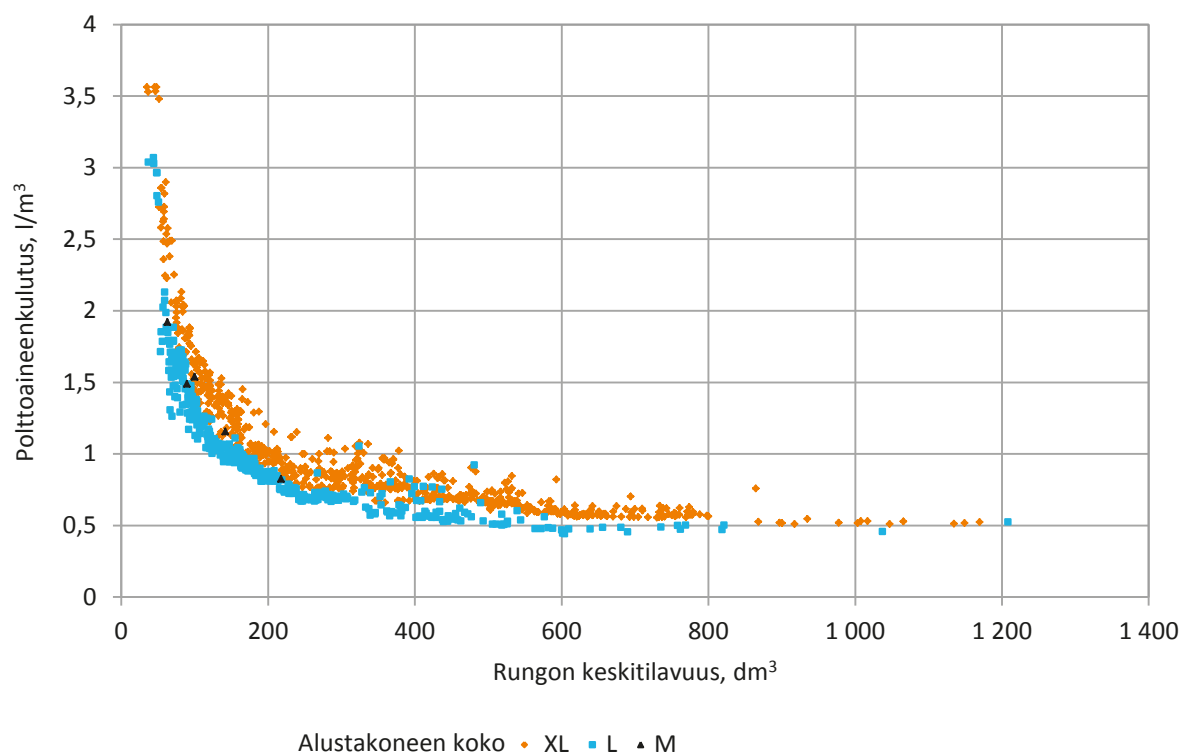
Kuva 29. Prosessin E₀-ajan polttoainekulutukseen (l/m^3) vaikuttavat tekijät John Deere- aineistossa SVM-mallin mukaan (ks. luku 2.5.2). Lukuarvoltaan negatiiviset tekijät vähentävät polttoainekulutusta, positiivisilla on päinvastainen vaikutus.



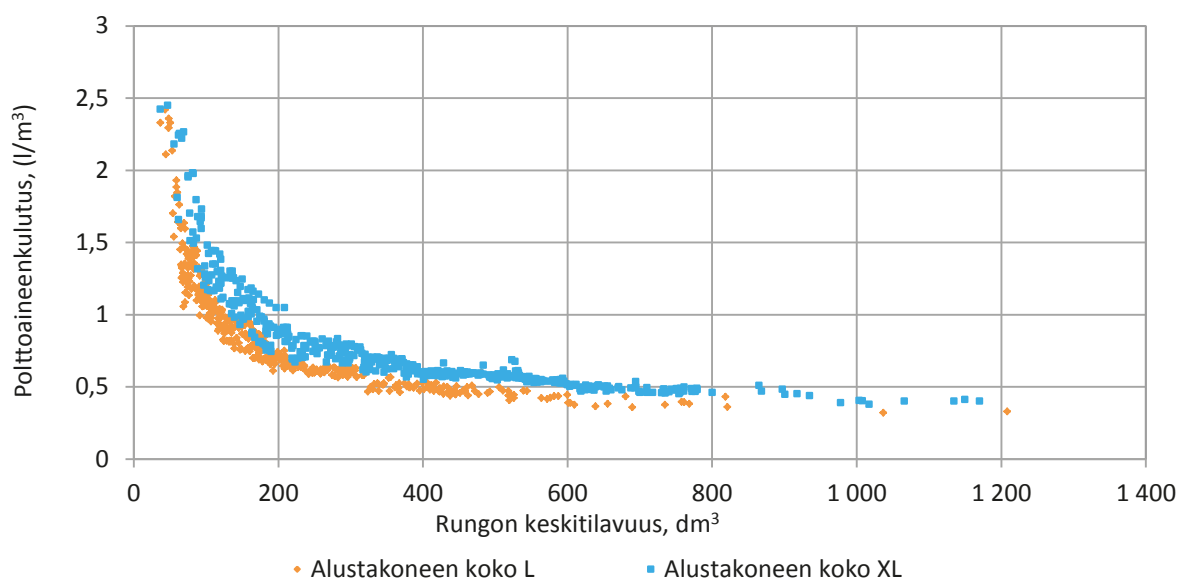
Kuva 30. Tuotantoaja polttoainekulutus (l/m^3) hakkuutavoittain (GBM-malli, ks. luku 2.5.2).



Kuva 31. Tuotantoajan polttoaineenkulutus (l/m³) puulajeittain, kaikki hakkuutavat.

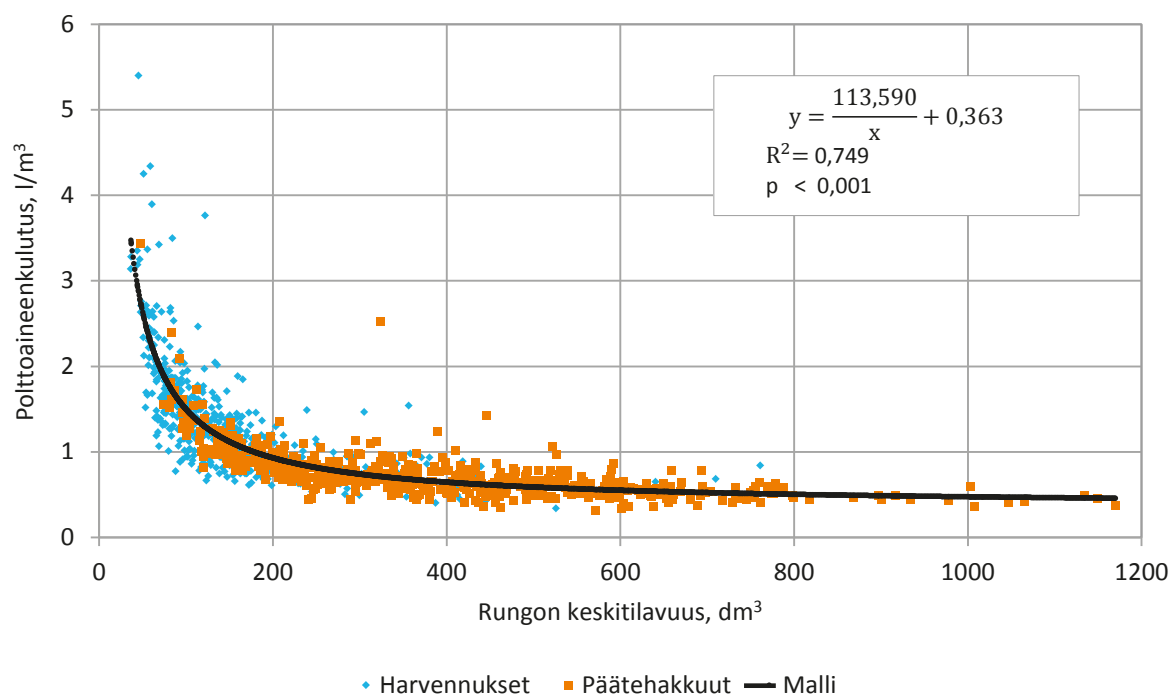


Kuva 32. Tuotantoajan polttoaineenkulutus alustakoneen kokoluokittain (l/m³) John Deere- ja Ponsse-aineistossa (GBM-malli, ks. luku 2.5.2).



Kuva 33. Alustakoneen kokoluokan vaikutus prosessoinnin E_0 -ajan polttoaineenkulutukseen John Deere -aineistossa (GBM-malli, ks luku 2.5.2).

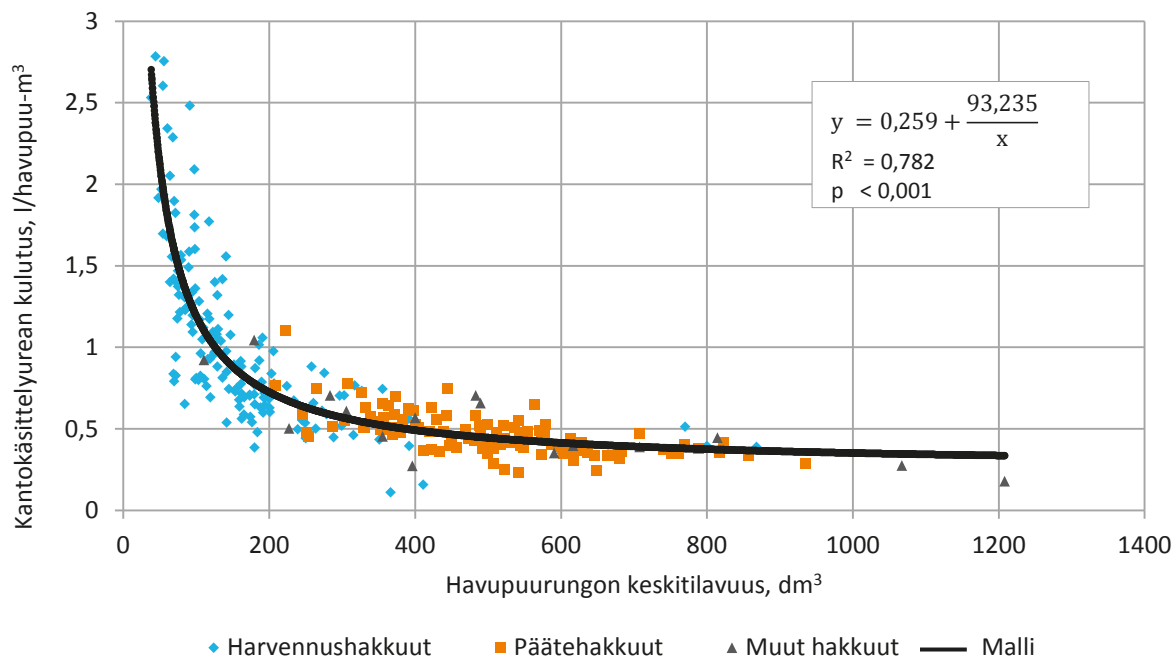
Kuvassa 34 on esitetty molemmille alustakoneen kokoluokille yhteinen regressiomalli tuotantoajan polttoaineenkulutukselle harvennus- ja päätehakkuilla John Deere -ja Ponsse-aineistossa. Tarkempi vertailu ei ollut mahdollista molemmat konemerkit kattavassa aineistossa vaihtelevien katkossuodatusaika- ja kulutusparametrien konemerkkikohtaisten erojen vuoksi.



Kuva 34. Tuotantoajan polttoaineenkulutus rungon keskitilavuuden funktiona harvennus- ja päätehakkuilla (kaikkien kokoluokkien koneet). Mallissa käytettiin tuotantoajan polttoaineenkulutusta.

3.5. Kantokäsittelyliuoksen kulutus

Kantokäsittelyureaa kului hakattua havupuukuutiometriä kohti keskimäärin 0,6 l (havupuiden runko-tilavuus keskimäärin 256 dm³). Rungon keskitilavuus vaikutti merkitsevästi urean kulutukseen (kuva 35).



Kuva 35. Kantokäsittelyliuoksen (urea) kulutus hakattua havupuukuutiometriä kohti havupuurunkojen keskitilavuuden funktiona.

4. Tarkastelu

Tulosten perusteella hakkuun tuottavuus on noussut huomattavasti 1990-luvun alkuun verrattuna. Harvennushakkuilla keskimääräinen tuotantoaikatuoottavuus oli lähes 30 % suurempi kuin Kuiton ym. (1994) seurantatutkimuksessa, vaikka rungon keskimääräinen tilavuus oli pienentynyt 183 dm³:sta 127 dm³:iin. Päätehakkuilla keskimääräinen tuotantoaikatuoottavuus oli noussut peräti 86 %, mutta runkotilavuuskin oli kasvanut 309 dm³:stä 327 dm³:iin (kuva 36). Vertailuun liittyy kuitenkin epävarmuutta, sillä otannan alueellisessa painottumisessa oli todennäköisesti eroa. Henttosen ym. (2019) tutkimus tukee kuitenkin päätelmää päätehakkuupuustojen järeytymisestä. He ovat todenneet, että suurikokoisten puiden osuus on lisääntynyt Suomessa huomattavasti viimeisten vuosikymmenten aikana, lähinnä parantuneen metsänhoidon ansiosta.

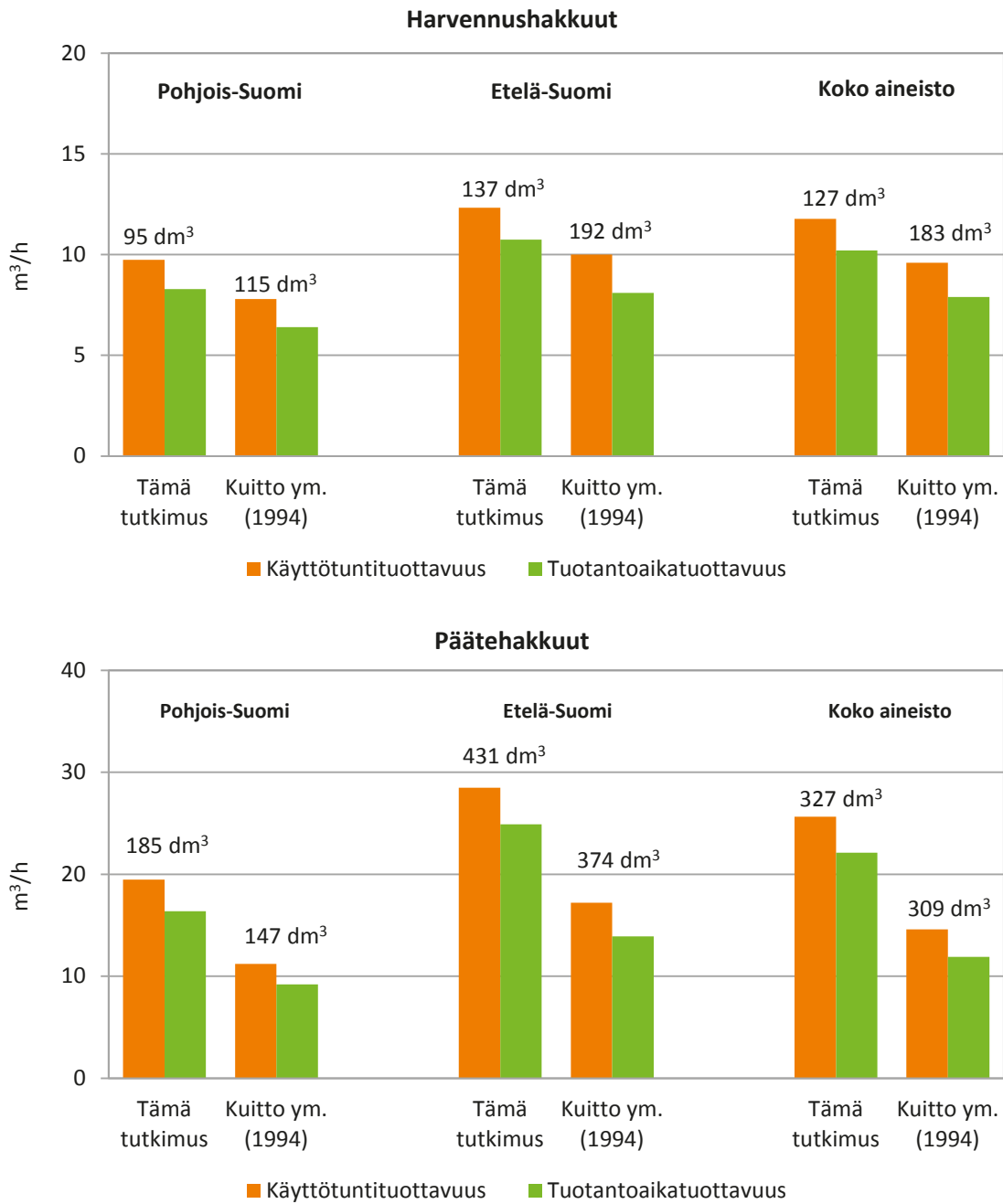
Erot E₁₅-aikojen laskentatavassa heikentävät käyttötuntituottavuuksien vertailtavuutta aikaisempiin tutkimuksiin, sillä tässä tutkimuksessa E₁₅-aikoihin voi sisältyä myös viittätoista minuuttia pidempiä jaksoja sellaista aikaa, joka yleensä luetaan keskeytykseksi (maastoajo, muu työ, siirtoajo). Toisaalta osa lyhytkestoisista prosessointijaksoista voi sisältyä maastoajoksi rekisteröityneeseen aikaan. Lisäksi E₀-ajat sisältävät enimmillään 15–30 s kestäneitä lyhyitä taukoja, jotka perinteisessä aikatuotantotutkimuksessa luokiteltaisiin lyhyiksi keskeytyksiksi. Myös seurantaan valikoitunut konekanta saattoi vaikuttaa aineiston leimikkorakenteeseen. Esimerkiksi kaikista pienimpiä hakkuukoneita otoksessa ei ollut lainkaan, mutta ensiharvennushakkuukohteilta hakatun puuston keskimääräinen runkotilavuus (86 m³) oli kuitenkin hyvin lähellä Kärhän ja Keskisen (2011) raportoimaa keskitilavuutta (82 dm³). Hakatut puumäärät olivat todellisuudessa hieman suurempia kuin ajanseurantatiedostojen hakkuukertymät, sillä hintamatriiseihin kuulumaton puu (tyvi- ja välileikot, alamittainen puu ym.) ei sisälly niihin. Hakkilan ym. (2003) vuonna 1997 Etelä-Suomessa tekemässä inventoinnissa tyvi- ja välileikkoja löytyi eniten kuusikoiden päätehakkuukohteilla (keskimäärin 2,2 m³/ha; 0,9 % hakkuukertymästä).

Tässä tutkimuksessa sovellettiin koneoppimista, koska vasteen (prosessoinnin tehoajanmenekin ja polttoaineenkulutuksen) sekä useiden selittäjien interaktioita on vaikea määrittää etukäteen jollakin tietyllä funktionaalisella muodolla. Koneoppimismallien hyvydet (rmse) määritetään ristiinvalidointimenetelmällä valitsemalla parhaiten toimivat regularisointiparametrien arvot. Tällä menetelmällä ennustetun prosessoinnin tehoajan menekin ja polttoaineenkulutuksen selitysasteet (R²) olivat GBM-malleilla 0,90 ja 0,82 ja SVM-malleilla 0,78 ja 0,65, joten mallien ennustekykyä voidaan pitää varsin hyvänä.

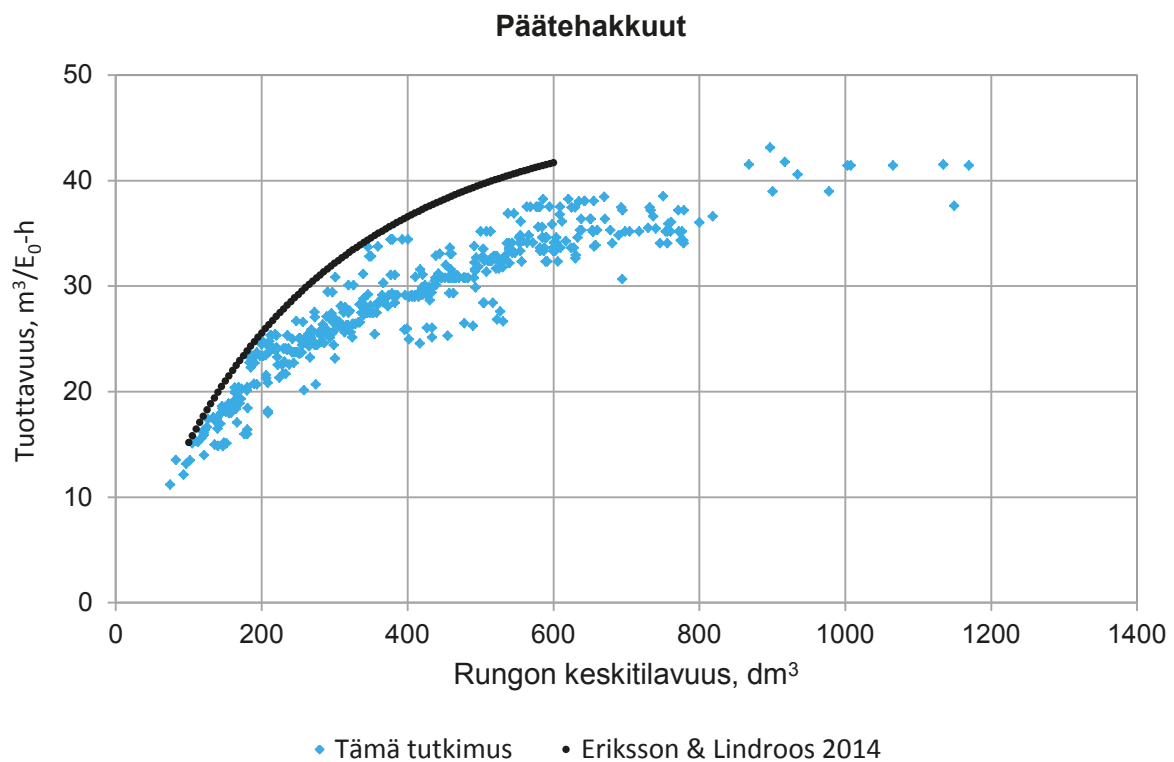
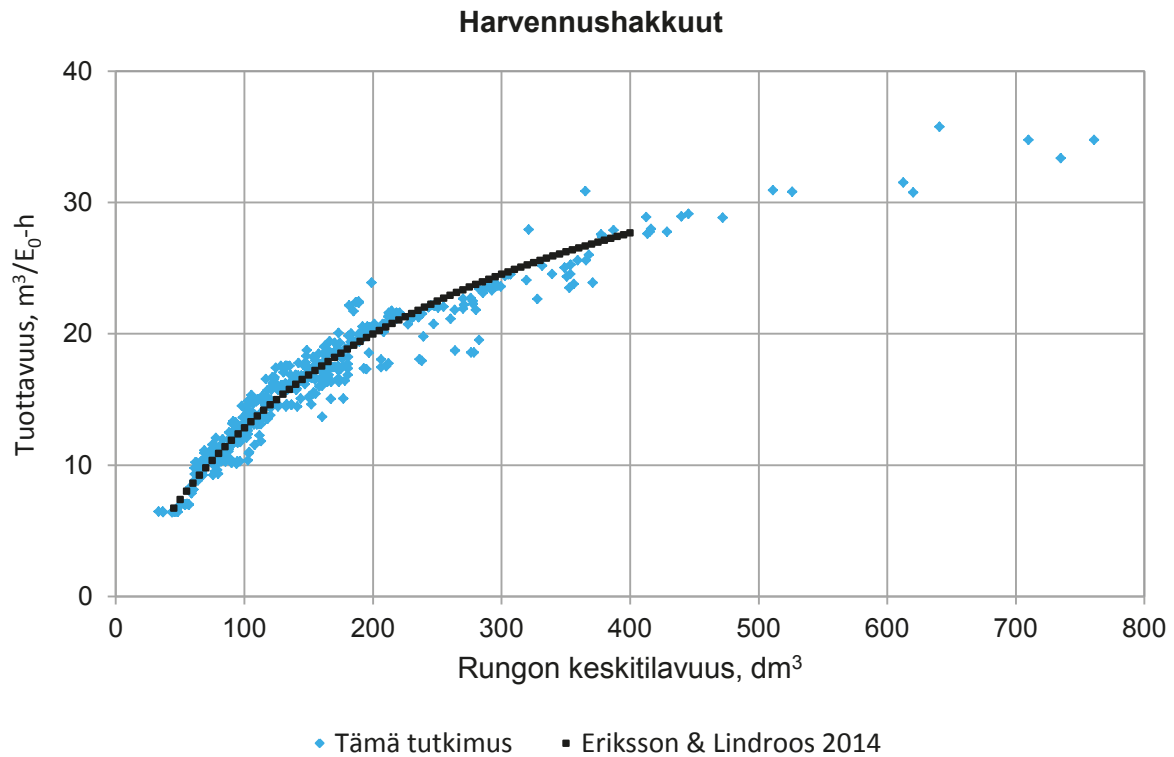
Kuiton ym. (1994) seurantatutkimuksessa harvennushakkuiden tuotantoaikatuoottavuus oli koko maassa keskimäärin 7,9 m³/h ja päätehakkuiden 11,9 m³/h. GBM-mallien mukaan prosessoinnin (hakkuun) ennustettu keskimääräinen E₀-tuottavuus vastaavilla runkotilavuuksilla (harvennukset 183 dm³, päätehakkuut 309 dm³) oli keskimääräisissä olosuhteissa harvennuksilla 19,3 m³/E₀-h ja päätehakkuilla 26,4 m³/E₀-h. Muista parametreista riippuen ennustettu tuottavuus vaihteli, harvennuksilla välillä 17,1–23,1 m³/E₀-h ja päätehakkuilla välillä 24,4–30,6 m³/E₀-h. Prosessoinnin E₀-ajan osuus tuotantoajasta oli harvennuksilla keskimäärin 70 % ja päätehakkuilla 72 %, joten tuotantoaikatuoottavuus olisi Kuiton ym. (1994) raportoimilla rungon keskitilavuuksilla harvennuksilla keskimäärin 13,5 m³/h ja päätehakkuilla 19,0 m³/h. Tämän vertailun perusteella tuottavuuskehitys on ollut harvennushakkuilla nopeampaa kuin päätehakkuilla, mikä voi johtua koneiden kehittymisen lisäksi mm. ajankäytön tehostumisesta. Päätehakkuilla koneiden teho on parantunut erityisesti suurten puiden käsittelyssä.

Kuvassa 37 verrataan tässä tutkimuksessa saatuja prosessoinnin (hakkuun) tehotuntituottavuuksia Erikssonin ja Lindroosin (2014) laajaan tutkimukseen, jonka aineisto kerättiin SCA:n työmailta Ruotsista. Hakkuukoneisiin asennetut värinänsensorit rekisteröivät työajan, ja puutavaran määrä todettiin tehdasmittauksessa. Harvennushakkuilla tulokset ovat yhdenmukaisia, mutta päätehakkuilla tuottavuudet näyttävät olevan Ruotsissa suurempia, etenkin järeäpuustoisissa kohteissa. Tämä voi johtua

tiedonkeruu- ja analyysimenetelmien erojen lisäksi mm. siitä, että puutavaralajeja tehtiin ruotsalais-tutkimuksessa huomattavasti vähemmän, päätehakuilla enintään seitsemää ja harvennuksilla korkeintaan kuutta, ja joukkokäsittelyä sovellettiin myös päätehakuilla. Myös puutavaran vähimmäisläpimitoissa saattoi olla eroja. Ruotsalaistutkimuksen tuottavuus päätehakuilla vastaa kuitenkin Kärhän ym. (2018a) tuloksia. Päätehakuilla käytetyt koneet olivat Erikssonin ja Lindroosin (2014) aineistossa järeämpiä koneita kuin tässä tutkimuksessa. Tuottavuuksien ero kasvoi rungon keskitilavuuden noustessa, joten myös tutkimukseen valikoituneella konekannalla saattoi olla vaikutusta. Tässä tutkimuksessa työskentelytavan mukauttaminen hakkuutähteen talteenoton vuoksi vähensi prosessoinnin tuottavuutta noin 10 %. Myös Eriksson ja Lindroos (2014) havaitsivat hakkuutähteen talteenoton valmistelun vähentävän tuottavuutta. Heidän aineistossaan hakkuutähdettä oli prosessoitu kasoihin 11 %:lla päätehakuukohteista, kun osuus tämän tutkimuksen ajanmenekin mallitusaineistossa oli päätehakuilla 14 %.



Kuva 36. Hakkuun keskimääräiset käyttötunti- ja tuotantoaikatuuottavuudet sekä vastaavat rungon keskitilavuudet tässä ja Kuiton ym. (1994) tutkimuksessa. Käyttötuntituottavuuksien vertailussa on otettava huomioon erot E₁₅-aikojen laskennassa.



Kuva 37. Tämän tutkimuksen GBM-mallien ja Erikssonin ja Lindroosin (2014) regressiomallien vertailu. Ruotsalaisen mallin runkotilavuudet muunnettiin kuorelliseksi lineaarisella mallilla, joka laskettiin Hakkilan ym. (2003) esittämien kuoren tilavuusosuuksien avulla.

Tutkimuksia vertailtaessa otettava huomioon se, että korjuulohkon sisäinen puustotunnusten ja korjuulosuhteiden vaihtelu voi olla suurta. Lyhytkestoisissa aikatutkimuksissa aineisto kerätään yleensä

helpohkosta maastosta, puusto on tasaista, ja tuottavuusmallit laaditaan runkokohtaisesti. Esimerkiksi Kärhän ym. (2018a) tutkimuksessa, jossa verrattiin tuulenkaatojen hakkuun tuottavuutta normaaliin avohakkuuseen, kolme kokenutta kuljettajaa (työkokemus yli 10 v) hakkasi yhteensä 591 runkoa tavallisilta avohakkuukohteilta, ja työsuoritukset videoitiin. Tämän tutkimuksen aineistosta puuttui tieto poistuman tiheydestä ja maastoluokasta, joiden on todettu vaikuttavan hakkuun tuottavuuteen (esim. Kuitto ym. 1994, Eriksson ja Lindroos 2014). Toisaalta Suomessa ei ole enää käytössä koneellisen puunkorjuun maastoluokitusta, eikä maastoluokka siten kuulu yleisiin taksaperusteisiin. Myös kuljettajalla voi olla suuri vaikutus tuottavuuteen. Harvennuksilla kuljettaja selitti Purfürstin ja Erlerin (2011) tutkimuksessa lähes 40 % tuottavuuden vaihtelusta, ja kokeneiden kuljettajienkin väliset erot käyttötuntituttavuudessa saattoivat olla jopa 80 %. Ennakkotulosten mukaan kuljettaja selittää lähes 40 % ennustetusta tuottavuuden vaihtelusta myös tämän tutkimuksen aineistossa.

Merkittävä osa Pohjois-Suomen päätehakuukertymästä tuli korjuulohkoilta, joilla rungon koko vastasi muiden alueiden harvennushakkuuta. Tulosten perusteella myös muut olosuhdetekijät saattoivat vaikuttaa alueiden välisiin tuottavuuseroihin. SVM-mallien mukaan prosessoinnin (hakkuun) tehoajanmenekki kuutiometriä kohti oli Itä-Suomessa suurempi kuin muilla alueilla. Siellä kuutiometriä kohti kertyi suhteellisesti enemmän ajomatkaa kuin muilla alueilla ja keskimääräinen maastoajonopeus oli pienempi kuin muualla, joskin matkamittarin tarkkuus vaihtelee kulkualustan ja koneen varustelun mukaan. Itä-Suomen aineisto kerättiin pääosin mäkisestä maastosta. Myös muita alueita suurempi puutavaralajien lukumäärä saattoi osaltaan selittää eroa. Lisäksi puiden runkomuoto saattaa vaihdella alueittain ja kasvupaikkatyypeittäin (Lindblad ym. 2018, Pitkänen 2019), mikä on voinut vaikuttaa tuloksiin.

Tulosten perusteella voidaan päätellä, että tutkimuksessa mukaan olleet koneet olivat varsinkin Pohjois-Suomessa suurehkoja hakatun puuston keskimääräiseen runkotilavuuteen nähden. XL-kokoluokan alustakoneiden tuottavuus alkoi erottua kokoluokkaa pienemmistä koneista vasta silloin, kun rungon keskitilavuus oli yli 300 dm³. Pohjois-Suomen koneiden hakkuukertymästä alle 20 % tuli tällaisilta kohteilta, mutta siellä yli 60 % puusta hakattiin XL-kokoluokan koneilla. Käytännössä pieni leimikkovaranto rajoittaa kuitenkin konekannan ohjausta. Hakkulaitteen koko on yleensä kytköksissä alustakoneen kokoon. Tulosten perusteella näyttää siltä, että myös hakkulaitteet olivat osittain ylimitoitettuja. Polttoaineenkulutuksestakin saadut tulokset viittaavat siihen, että suurilla koneilla työskenneltiin osittain niiden optimaalisen käyttöalueen ulkopuolella. Näihin päätelmiin liittyy kuitenkin paljon epävarmuutta, koska aineisto on pienehkö, ja korjuuolosuhteet tunnetaan heikosti. Lisäksi mm. kuljettajalla, koneen säädöillä ja koneen kunnossapidolla (esim. teräketjun ja karsintaterien kunto, rullapaineet) voi olla merkittävä vaikutus polttoaineenkulutukseen. Kaluston vaikutusta polttoaineenkulutukseen olisikin syytä tutkia kontrolloiduissa olosuhteissa. Kantokäsittelyliuoksen kulutuksesta saatu tulos oli yhdenmukainen Kärhän ym. (2018b, 2018c) tutkimuksen kanssa.

Puunkorjuun lisätöiden aiheuttamista keskeytyksistä ei saatu kattavaa tietoa. Kuljettajat todennäköisesti unohtivat rekisteröidä osan keskeytyksistä, mutta keskeytyksiä jäi tallentumatta myös siksi, että niiden kesto jäi alle asetetun viiden minuutin katkossuodatusajan. Seurannan alussa kokeiltiin 54 korjuulohkon aineistossa yhdellä koneella (John Deere) menettelyä, jossa katkossuodatusaikana oli 15 minuuttia, mutta kuljettajia pyydettiin rekisteröimään kaikki erikseen seurattavat keskeytykset niiden kestosta riippumatta. Tähän lohko-kohtaiseen aineistoon tuli yhteensä 63 keskeytystietoa, ja yksittäisen keskeytyslajin yhteenlaskettu ajanmenekki jäi alle viiden minuutin 16 prosentilla lohkoista. Hallinnollisten tehtävien (raportointi, kuviotietojen päivitys) ajanmenekki lohkoa kohti jäi tyypillisimmin alle viiden minuutin. Kontrollimittaus oli kokeilussa yleisimmin esiintynyt keskeytystyyppi, ja sitä rekisteröityi 38 prosentille lohkoista. Kontrollimittauksen ajanmenekki lohkoa kohti jäi alle viiden minuutin kuudesosalla korjuulohkoista. Korjuulohkojen keskimääräinen hakkuukertymä oli 315 m³ tässä testiaineistossa.

Katkossuodatusaikojen vaihtelun vuoksi ainoastaan pieni osa aineistosta sopi käyttöasteiden laskentaan. Tulosten perusteella koneiden käyttövarmuus on parantunut, joskin seurannassa olleet koneet olivat uudehkoja. Seurannan loppuun mennessä vähintään vuoden vanhojen koneiden vuotuisten käyntituntien keskiarvo oli lähes neljänneksen suurempi kuin Viitamäen ym. (2017) selvityksessä. Siinä Suomen markkinoilla olleiden käytettyjen hakkuukoneiden mittareissa oli keskimäärin 2071 tuntia, ja näiden vaihtokoneiden keski-ikä oli 6,8 vuotta. Tässä tutkimuksessa seurannan päättyessä vähintään vuoden vanhat koneet olivat olleet käytössä keskimäärin 3,3 vuotta.

Koneiden yhteenlasketun ajankäytön perusteella määritetty tekninen käyttöaste oli 90 %, kun se Kuiton ym. (1994) tutkimuksessa oli 81 %. Myös Nordfjellin ym. (2010) selvityksen mukaan hakkuukoneiden tekninen käyttöaste on noussut, Ruotsissa 70 %:sta 85 %:iin vuosien 1985 ja 2008 välillä. Tässä tutkimuksessa saatu tulos voi kuitenkin olla yliarvio, sillä esimerkiksi ennalta suunnitellut korjaukset ja suuremmat huollot eivät rekisteröidy korjuulohkokohtaiseen ajanseurantaan. Myös toiminnallinen käyttöaste näyttäisi nousseen 1990-luvun alkuun verrattuna, erilaisista lisätöistä huolimatta. Sekä tekninen että toiminnallinen käyttöaste ovat linjassa Venäläisen ym. (2017) kirjallisuuskatsauksen tuoreimpien lukujen kanssa, vaikka koneiden siirroista ei saatukaan luotettavaa tietoa. Toiminnallinen käyttöaste kuvaa koneen valmiutta työhön silloin, kun työtä on tarjolla. Kapasiteetin käyttöaste olisi arvokas lisätieto arvioitaessa koneiden käytön tehokkuutta, mutta sitä ei laskettu, koska aineisto seuranta-ajalta ei ollut kaikilta osin aukotonta.

5. Päätelmät

Metsätyön tutkimus on murrosvaiheessa. Metsäkoneet keräävät valtavia määriä tietoa, jota voitaisiin hyödyntää monipuolisesti tutkimuksessa ja yritysten toiminnanohjauksessa. Metsäkonetieto on suurelta osin standardoitua, mutta tämän tutkimuksen aineistossa muuttujien sisältö vaihteli konemerkeittäin ja jopa saman konemerkin sisällä. Metsäkonevalmistajien tulisikin kiinnittää entistä enemmän huomiota tiedonkeruun yhdenmukaistamiseen. Myös kuljettajien kouluttamiseen kannattaa panostaa, sillä huolimattomasti tehty tietojen rekisteröinti heikentää aineiston laatua.

Aikakäsitteiden erot tulee tehdä selväksi, mikäli tämän tutkimuksen tuloksia käytetään erilaisten kustannuslaskentamallien päivittämiseen. Puunkorjuun yksikkökustannusten laskenta perustuu usein käyttötuntituotokseen, jota ei voida laskea totutulla tavalla StanForD Classic –standardin mukaisista ajanseurantatiedoista. Uuden StanForD 2010–standardin mukaista ajanseurantatiedosta pystytään laskemaan joustavammn pohjoismaisen metsätyöntutkimuksen normien mukaisia tunnuslukuja, mutta laskentaperiaatteista pitäisi sopia yleisesti. Vähintäänkin alan termistö vaatii päivityksen koneaikaan.

Alueelliset erot ajankäytön rakenteessa ja tuottavuudessa viittaavat siihen, että taustalla saattaa olla suuriakin eroja korjuuolosuhteissa. Siksi tulosten perusteella ei pidä tehdä johtopäätöksiä puunkorjuun tehokkuudesta tutkimuksessa käytettyjä maantieteellisiä alueita pienemmillä kokonaisuuksilla. Yhdistämällä seuranta-aineistoon tietoa korjuuolosuhteista, lisätöiden ajanmenekistä, aineiden ja tarvikkeiden kulutuksesta ym. voidaan saada tarkkaa tietoa puunkorjuun kannattavuuden laskutusperusteiden tarkempaan määrittelyyn. Ajanseurantatiedon automatisoidulla lähetyksellä varmistetaan aukoton aineisto, jonka avulla voidaan seurata koneiden käytön tehokkuutta vaivattomasti. Tässä tutkimuksessa kerätty tieto hakkuutähteen korjuusta ja kantokäsittelystä ovat esimerkkejä käyttäjälähtöisestä tiedosta, jota voitaisiin hyödyntää kustannuslaskennan tukena.

Keväällä 2018 voimaan tullut EU:n tietosuoja-asetus rajoittaa metsäkonedatan hyödyntämistä, ja Suomessa on laadittu kattava suositus metsäkonetiedon omistuksesta ja käytöstä (Metsäteho 2018). Mm. tutkimuksen ja erilaisten datapankkien rakentamisen kannalta olisi eduksi, jos ajanseurantatiedot voitaisiin tuottaa siten, että ne eivät sisällä salassapidettävää tietoa.

Kirjallisuus

- Eriksson, M. & Lindroos, O. 2014. Productivity of harvesters and forwarders in CTL in northern Sweden based on large follow-up datasets. *International Journal of Forest Engineering* 25(3): 179–200.
- Forest Work Study Nomenclature. 1995. Test Edition valid 1995–2000. International Union of Forestry Research Organisations, WP 3.04.02. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Operational Efficiency. Garpenberg. 16 s.
- Friedman, J.H. 2001. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *The Annals of Statistics* 29(5): 1189–1232.
- Haarlas, R., Harstela, P., Mikkonen, E. & Mäkelä, J. 1984. Metsätyöntutkimus. Helsingin yliopisto, metsäteknologian laitos. Tiedonantoja no. 46. 50 s.
- Hakkila, P., Saranpää, P., Kalaja, H. & Repola, J. 2003. Suomalainen havupuu. Laadun vaihtelu ja hallinta. Julkaisematon käsikirjoitus. Helsinki. 43 s.
- Henttonen, H., Nöjd, P., Suvanto, S., Heikkinen, J. & Mäkinen, H. 2019. Large trees have increased greatly in Finland during 1921–2013, but recent observations on old trees tell a different story. *Ecological Indicators* 99(2019): 118–129.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X18309488?via%3Dihub>
- Kohavi R. 1995. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In: *IJCAI'95 Proceedings of the 14th international joint conference on artificial intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers. San Francisco, CA. s. 1137–1143.
- Kuitto, P.-J., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Tiedotus 410. Metsäteho. 38 s. + liitteet.
- Kärhä, K. & Keskinen, S. 2011. Ensiharvennukset metsäteollisuuden raaka-ainelähteenä 2000-luvulla. Metsätehon tulosalvosarja 2/2011. 29 s. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/Tulosalvosarja_2011_02_Ensiharvennukset_mets%C3%A4teollisuuden_raaka-ainel%C3%A4hteen%C3%A4_kk_slk.pdf
- Kärhä, K., Anttonen, T., Poikela, A., Palander, T., Lauren, A., Peltola, H. & Nuutinen, Y. 2018a. Evaluation of salvage logging productivity and costs in windthrown Norway spruce –dominated forests. *Forests* 2018, 9, 5. 22 s. <https://www.mdpi.com/1999-4907/9/5/280>
- Kärhä, K., Koivusalo, V., Palander, T. & Ronkainen, M. 2018b. Treatment of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* stumps with urea and *Phlebiopsis gigantea* for control of heterobasidion. *Forests* 2018, 9. 17 s.
- Kärhä, K., Koivusalo, V. & Ronkainen, M. 2018c. Kantokäsittelyliuoksen kulutus juurikäävän torjunnassa. Metsätehon tulosalvosarja 5/2018. 20 s. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tulosalvosarja_2018_05_Kantokasittelyliuoksen_kulutus_juurikaavan_torjunnassa.pdf
- Lindblad J., Kilpeläinen H., Heikkinen J. (2018). Hakkuukonemittauksen tyvifunktio männyn tyviosan tilavuuden määrittämisessä. Metsätieteen aikakauskirja 2018-7805. Tutkimusartikkeli. 26 s. <https://doi.org/10.14214/ma.7805>
- Metsäteho. 2018. Metsäkonetiedon omistusta, käyttöä ja käsittelyä koskevat periaatteet -suositus. 16.10.2017. Verkojulkaisu. 21 s. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Metsakonetieto_Suositus_2017-10-16.pdf
- Microsoft. 2017. Office VBA Reference 6/12/2017. <https://msdn.microsoft.com/en-us/vba/office-vba-reference>.
- Mierswa, I., Wurst, M., Klinkenberg, R., Scholz, M. & Euler, T. 2006. YALE: Rapid prototyping for complex data mining tasks. Julkaisussa: *Proceedings of the 12th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (KDD '06)*. ACM. New York, NY, USA. s. 935–940.
- Nordfjell, T., Björheden, R., Thor, M. & Wästerlund, I. 2010. Changes in technical performance, mechanical availability and prices of machines used in forest operations in Sweden from 1985 to

2010. *Scandinavian Journal of Forest Research* (25)4: 382–389.
<https://doi.org/10.1080/02827581.2010.498385>
- Nuutinen, Y. 2013. Possibilities to use automatic and manual timing in time studies on harvester operations. *Dissertationes Forestales* 156. 68 s.
<https://dissertationesforestales.fi/pdf/article1939.pdf>
- Pitkänen, T. 2019. Maalaseraineistosta tuotetut tilavuustiedot. Metsätieto ja sähköiset palvelut – hankkeen lopputulosseminaari, 22.01.2019. <https://mmm.fi/tapahtumat/2019-01-22/metsatieto-ja-sahkoiset-palvelut-hankkeen-lopputulosseminaari>
- Purfürst, F.T. & Erler, J. 2011. The human influence on productivity in harvester operators. *International Journal of Forest Engineering* 22(2): 15–22.
- Rüping, S. 2000. mySVM Manual. Universität Dortmund, Lehrstuhl Informatik VIII.
<http://wwwai.cs.uni-dortmund.de/SOFTWARE/MYSVM/>
- Skogforsk. 2012. StanForD variables in numerical order. 106 s.
https://www.skogforsk.se/contentassets/b063db555a664ff8b515ce121f4a42d1/allvarno_eng_120418.pdf.
- Strandström, M. 2018. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2017. Metsätehon tulosalvosarja 8a/2018. Metsäteho Oy. 32 s. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tulosalvosarja_2018_08a_Puunkorjuu_ja_kaukokuljetus_vuonna_2017.pdf
- Vapnik, V. 1995. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer-Verlag, New York. 187 s.
- Vapnik, V. 1998. *Statistical Learning Theory*. Wiley-Interscience. 768 s.
- Venäläinen, P., Alanne, H., Ovaskainen, H., Poikela, A. & Strandström, M. 2017. Kausivaihtelun vähentämisen keinot ja kustannukset puun toimitusketjussa. Metsätehon tulosalvosarja 8/2017. Päivitetty versio 1.2.2018. 76 s. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tulosalvosarja_2017_08_Kausivaihtelun-kustannukset.pdf.
- Viitamäki, K., Laitila, J., Malinen, J. & Väättäin, K. 2015. Metsäkoneiden vuotuiset käyttötunnit ja vaihtokonemarkkinoiden rakenne Euroopassa. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 37/2015. 30 s. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/486127/luke-luobio_37_2015.pdf?sequence=6
- Wang, Y., Chen, Q., Kang, C., Xia, Q. & Luo, M. 2017. Sparse and Redundant Representation-Based Smart Meter Data Compression and Pattern Extraction. *IEEE Transactions on Power Systems* 32(3): 2142 - 2151.
- Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) 2014. Metsänhoidon suositukset. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja. 181 s. http://tapio.fi/wp-content/uploads/2015/06/Metsanhoidon_suosituks_3_ver3_net_1709141.pdf

LIITE 1

Seurantatutkimuksen koko aineisto alueittain ja hakutavoittain.

Alue	Hakkuutapa		Hakkuu- kertymä yht., m ³	Runkoja, kpl	Rungon keskitil, dm ³	Lohkon keskikoko, m ³	Lohkoja kpl
Pohjois-Suomi	Harvennukset	Ensiharvennus	4029	53401	75	224	18
		Muu harvennus	37788	384526	98	288	131
		<i>Kaikki harvennukset</i>	41817	437927	95	281	149
	Päätehakkuut	Kaistalehakkuu	586	2315	253	293	2
		Avohakkuu	71164	399958	178	498	143
		Siemenpuuhakkuu	11713	47062	249	586	20
		<i>Kaikki päätehakkuut</i>	83462	449335	186	506	165
	Muut hakkuut	Ylispuiden poisto	8189	30360	270	227	36
		Suojuspuuhakkuu	2451	15208	161	490	5
		Määrittelemätön erikoish.	1913	16298	117	638	3
		Myrskytuhojen korjuu	40	222	182	20	2
		Linjojen aukaisu	115	1107	104	29	4
		Energiapuun korjuu	3864	86895	44	552	7
		Muu erikoishakkuu	209	938	223	209	1
		Ei tietoa	53	987	54	18	3
		<i>Kaikki muut hakkuut</i>	16835	152015	111	276	61
	<i>Kaikki hakkuut</i>		142114	1039277	137	379	375
Länsi-Suomi	Harvennukset	Ensiharvennus	34220	392996	87	243	141
		Muu harvennus	128848	812778	159	379	340
		<i>Kaikki harvennukset</i>	163068	1205774	135	339	481
	Päätehakkuut	Avohakkuu	180088	421975	427	590	305
		Siemenpuuhakkuu	4867	20752	235	348	14
		<i>Kaikki päätehakkuut</i>	184955	442727	418	580	319
	Muut hakkuu	Ylispuiden poisto	7216	19775	365	206	35
		Verhopuu.	71	275	258	71	1
		Määrittelemätön erikoish.	3562	14761	241	237	15
		Myrskytuhojen korjuu	902	2454	367	82	11
		Linjojen aukaisu	2775	13639	203	47	59
		Tonttipuuston hakkuu	1294	4134	313	259	5
		Muu erikoishakkuu	184	1090	168	184	1
		Ei tietoa	2506	6656	377	627	4
		<i>Kaikki muut hakkuut</i>	18510	62784	295	141	131
	<i>Kaikki hakkuut</i>		366533	1711285	214	394	931
Itä-Suomi	Harvennukset	Ensiharvennus	5503	60720	91	290	19
		Muu harvennus	26040	152382	171	413	63
		<i>Kaikki harvennukset</i>	31544	213102	148	385	82
	Päätehakkuut	Avohakkuu	78177	165957	471	625	125
		Siemenpuuhakkuu	1360	5460	249	680	2
		<i>Kaikki päätehakkuut</i>	79537	171417	464	626	127
	Muut hakkuut	Ylispuiden poisto	1122	3096	363	224	5
		Suojuspuuhakkuu	561	1534	366	280	2
		Määrittelemätön erikoish.	1484	10815	137	495	3
		Myrskytuhojen korjuu	322	936	344	107	3
		Linjojen aukaisu	3	7	481	3	1
		Tonttipuuston hakkuu	1108	4269	259	369	3
		Ei tietoa	1879	4235	444	376	5
		<i>Kaikki muut hakkuut</i>	6479	24892	260	295	22
	<i>Kaikki hakkuut</i>		117560	409411	287	509	231
Koko aineisto	Harvennukset		236429	1856803	127	332	712
	Päätehakkuut		347954	1063479	327	569	611
	Muut hakkuut		41824	239691	174	195	214
	<i>Kaikki hakkuut</i>		626207	3159973	198	407	1537

LIITE 2

John Deere - ja Komatsu-aineisto.

Alue	Hakkuutapa		Hakkuu- kertymä yht., m ³	Runkoja, kpl	Rungon keskitil, dm ³	Lohkon keskikoko, m ³	Lohkoja kpl
Pohjois-Suomi	Harvennukset	Ensiharvennus	3884	50686	77	243	16
		Muu harvennus	31590	304327	104	329	96
		<i>Kaikki harvennukset</i>	35474	355013	100	317	112
	Päätehakkuut	Kaistalehakkuu	586	2315	253	293	2
		Avohakkuu ¹	56484	295674	191	533	106
		Siemenpuuhakkuu	9537	33775	282	636	15
		<i>Kaikki päätehakkuut</i>	66606	331764	201	542	123
	Muut hakkuut	Ylispuiden poisto	5273	18121	291	293	18
		Määrittelemätön erikoish.	1913	16298	117	638	3
		Myrskytuhojen korjuu	40	222	182	20	2
		Linjojen aukaisu	115	1107	104	29	4
		Energiapuun korjuu	3864	86895	44	552	7
		Muu erikoishakkuu	209	938	223	209	1
		Ei tietoa	53	987	54	18	3
		<i>Kaikki muut hakkuut</i>	11467	124568	92	302	38
	<i>Kaikki hakkuut</i>		113548	811345	140	416	273
Länsi-Suomi	Harvennukset	Ensiharvennus	30188	337501	89	238	127
		Muu harvennus	102195	611499	167	399	256
		<i>Kaikki harvennukset</i>	132383	949000	139	346	383
	Päätehakkuut	Avohakkuu	151353	343228	441	613	247
		Siemenpuuhakkuu	4564	18918	241	380	12
		<i>Kaikki päätehakkuut</i>	155917	362146	431	602	259
	Muut hakkuut	Ylispuiden poisto	5789	16746	346	193	30
		Määrittelemätön erikoish.	3341	13705	244	334	10
		Myrskytuhojen korjuu	864	2374	364	86	10
		Linjojen aukaisu	2775	13639	203	47	59
		Tonttipuuston hakkuu	1294	4134	313	259	5
		Muu erikoishakkuu	184	1090	168	184	1
		Ei tietoa	2506	6656	377	627	4
		<i>Kaikki muut hakkuut</i>	16754	58344	287	141	119
	<i>Kaikki hakkuut</i>		305054	1369490	223	401	761
Itä-Suomi	Harvennukset	Ensiharvennus	5503	60720	91	290	19
		Muu harvennus	26040	152382	171	413	63
		<i>Kaikki harvennukset</i>	31544	213102	148	385	82
	Päätehakkuut	Avohakkuu	78177	165957	471	625	125
		Siemenpuuhakkuu	1360	5460	249	680	2
		<i>Kaikki päätehakkuut</i>	79537	171417	464	626	127
	Muut hakkuut	Ylispuiden poisto	1122	3096	363	224	5
		Suojuspuuhakkuu	561	1534	366	280	2
		Määrittelemätön erikoish.	1484	10815	137	495	3
		Myrskytuhojen korjuu	322	936	344	107	3
		Linjojen aukaisu	3	7	481	3	1
		Tonttipuuston hakkuu	1108	4269	259	369	3
		Ei tietoa	1879	4235	444	376	5
		<i>Kaikki muut hakkuut</i>	6479	24892	260	295	22
	<i>Kaikki hakkuut</i>		117560	409411	287	509	231
Koko aineisto	Harvennukset		199401	1517115	131	346	577
	Päätehakkuut		302060	865327	349	593	509
	Muut hakkuut		34701	207804	167	194	179
	<i>Kaikki hakkuut</i>		536162	2590246	207	424	1265

LIITE 3

Tutkimuksessa käytetty ajanjaottelu

Koneen käytössä ollut työaika	Laskettiin kuljettajakohtaisten työvuorojen aloitus- ja lopetuskirjautumisten perusteella (muuttuja 318, WORKTIME). Standardin mukaan ajat sisältävät kaiken ajankäytön kirjautumisten välillä (myös mahd. ruokatauot), eivätkä kuljettajien päällekkäiset kirjaukset ole mahdollisia. Laskennassa voitiin hyödyntää ainoastaan John Deeren -aineiston työaikoja, sillä muilla merkeillä oli leikkautunut pois aikajaksoja työvuorojen aloitus- ja lopetusajankohtien väliltä, ja muuttujan 318 luvut vastasivat tuotantoaikoja. Koneen työaika ei kuitenkaan voitu kohdistaa korjuulohkolle, jos työvuorojen aikana hakattiin useampaa kuin yhtä lohkoa tai tehtiin jotakin muuta lohkolle kohdistumatonta työtä.
Tuotantoaika (hyödynnetty aika)	Korjuulohkolla työn suorittamiseen välittömästi (prosessointi) tai välillisesti (maastoajo, muu työ, siirtoajo) kulunut aika, joka sisältää käyttöajan lisäksi kaikki keskeytykset. Tuotantoaikojen laskenta-aineisto käsitti kaikki kolme konemerkkiä.
Käyttöaika (E_t)	Välittömästi (prosessointi) tai välillisesti työn (maastoajo, muu työ, siirtoajo) suorittamiseen kulunut aika sekä asetettua katkossuodatusaika lyhyemmät keskeytykset. E_{15} -ajat sisältävät E_t -aikojen lisäksi kaikki alle 15 minuutin keskeytykset 317 (IRTIME).
Teho aika (E_0)	Ainoastaan John Deere- ja Komatsu-aineistot sisälsivät E_0 -tason ajat, jotka on jaettu prosessointiin, maastoajoon, muuhun työhön ja siirtoajoon muuttujassa 316 (RUNTIME). Osa-ajat sisältävät myös lyhyitä, minimisuodatusajan alittavia ”mikrotaukoja”, joiden kesto oli tässä tutkimuksessa enintään 15–30 sekuntia. Prosessoinniksi rekisteröityneen E_0 -ajan oletettiin vastaavan tavanomaisen metsätyöntutkimuksen tehoaikaa. Se sisältää useimmissa tapauksissa myös lyhyet, pääsuodatusajan alittavat siirtymiset työpisteestä toiseen.
Siirtoaika	Ajanseurannassa lavettisiirrot kirjautuvat keskeytyksiin (muuttuja 317, IRTIME) ja siten osaksi tuotantoaika, mikäli ne tehdään lohkoille rekisteröidyn työajan puitteissa. Tietoa koneen työmaalta toiselle siirtämiseen kuluneesta ajasta saatiin muutamalta koneelta, mutta tieto ei ole kattavaa. Myös siirtoajaksi muuttujaan 316 rekisteröitynyt aika tulkittiin koneen siirroksi. Huomattava osa koneiden siirroista oli ulkoistettu, joten niihin kulunut aika ei kirjautunut korjuulohkoikohtaisiin ajanseurantatiedostoihin.



Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000